



Undersøgelse af vindforhold ved det kommende testcenter ved Østerild

Mann, Jakob; Courtney, Michael; Hummelshøj, Poul; Hjuler Jensen, Peter

Publication date:
2010

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

Citation (APA):
Mann, J., Courtney, M., Hummelshøj, P., & Hjuler Jensen, P. (2010). *Undersøgelse af vindforhold ved det kommende testcenter ved Østerild*. Danmarks Tekniske Universitet, Risø Nationallaboratoriet for Bæredygtig Energi. Denmark. Forskningscenter Risø. Risø-R No. 1743(EN)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Undersøgelse af vindforhold ved det kommende testcenter ved Østerild

Risø-R-Report

Jakob Mann, Mike Courtney,
Poul Hummelshøj og Peter Hjuler Jensen
Risø-R-1743(DA)
August 2010

Risø DTU
Nationallaboratoriet for Bæredygtig Energi



Forfatter: Jakob Mann, Mike Courtney, Poul Hummelshøj og Peter Hjuler Jensen
Titel: Undersøgelse af vindforhold ved det kommende testcenter ved Østerild
Afdeling: Vindenergi

Abstract (in English) (max. 2000 char.):

A new test station for large wind turbines is planned for a currently forested area in Thy, Denmark. This report documents the numerical modeling and measurements that have been conducted in order to determine how much of the existing forest should be cleared. It is seen that with the current vegetation cover, the wind shear and turbulence intensity in the lower 100m are quite severe. Tree clearances out to several distances are investigated. It is found that a distance from the wind turbines to the forest edge of 1,5km is probably sufficient to give acceptable flow conditions for the proposed test station.

Risø-R-1743(DA)
August 2010

ISSN 0106-2840
ISBN 978-87-550-3838-7

Kontrakt nr.:

Gruppens reg. nr.:
(Føniks PSP-element)

Sponsorship:

Forside :

Sider:
Tabeller:
Referencer:

Afdelingen for Informationsservice
Risø Nationallaboratoriet for
Bæredygtig Energi
Danmarks Tekniske Universitet
Postboks 49
4000 Roskilde
Danmark
Telefon 46774005
bibl@risoe.dtu.dk
Fax 46774013
www.risoe.dtu.dk

Indhold

1	Baggrund	5
1.1	Vindforhold på et testcenter for store vindmøller	5
	Mekanisk opbremsning af vinden	5
	Andre effekter – Terræn, atmosfærisk stabilitet og store konstruktioner	5
	Turbulens i vinden	5
	Hvor meget energi producere en vindmølle?	5
	Kan en vindmølle holde?	6
	Om begrebet ”ruhed” af et terræn	6
2	Krav til vindforhold på testpladsen	8
2.1	Test af vindmøller foretages efter internationale standarder	8
	Grundlaget for godkendelse af vindmøller	8
	Effektkurvemålinger	9
	Lastmålinger	9
	Støjmålinger	9
	El-kvalitetsmålinger	9
2.2	Ønsker til vindhastighed og turbulens	9
3	Meteorologisk modellering af vinden	10
3.1	Kort beskrivelse af modellen SCADIS	10
3.2	Sammendrag af modelkørsler	10
3.3	Resultater fra modelkørsler	13
	Vindprofiler	13
	Turbulens	13
4	Beskrivelse af de udførte målinger	15
4.1	Formålet	15
4.2	Valg af målepositioner	15
4.3	Instrumenter	16
4.4	Målekampagne	19
5	Måleresultater	22
5.1	Sammenligning af nøgleparametre fra Østerild og Høvsøre	22
5.2	Profiler af middelhastighed og turbulensintensitet	22
5.3	Variation af turbulens med vindretning	23
5.4	Variationen af turbulensintensitet med afstand til skovkant	26
5.5	Variationen af shear med afstand til skovkant	26
6	Opsamling og diskussion	29
7	Konklusion	29
	Referencer	30
	Anerkendelser	30

Forord

Folketinget har den 4 juni 2010 vedtaget et lovforslag om oprettelse af et nyt testcenter for store vindmøller ved Østerild (lovforslag nr. L 206). Det nye testcenter kommer til at ligge i et skovområde ved Østerild og Hjørdemål Klitplantager. Træernes tilstedeværelse påvirker markant strømningsforhold i området. Det er vigtigt for et vindmølle testcenter at både shear (variationen af vinden med højde) og turbulens (vinden's hurtige variationer) ligger indenfor visse grænse. Overskrides grænserne bliver usikkerheden på målingerne for stor.

Et af de vigtigste spørgsmål angående Østerild placeringen er hvor mange af træerne det er nødvendige at fælde for at kunne etablere et testcenter af høj kvalitet. Denne rapport dokumenterer den eksisterende strømningsforhold ved Østerild ud fra nye målinger foretaget på stedet. Baseret på disse målinger samt supplerende modellering gives der en anbefaling af den nødvendige afstand mellem møllerne og skovgrænse for det kommende testcenter.

Arbejdet er udført af Afdeling for Vindenergi, Risø DTU i samarbejde med en arbejdsgruppe bestående af Risø DTU, Siemens Wind Power AS, Vestas Energy Systems AS, Skov- og Naturstyrelsen og Vindmølleindustrien.

1 Baggrund

1.1 Vindforhold på et testcenter for store vindmøller

Mekanisk opbremsning af vinden

Når vinden blæser hen over jorden eller havet, så bremses den op pga. den modstand den møder på overfladen. Denne opbremsning forplanter sig opad i højden og bestemmer dermed det vertikale vindprofil. Hvis man måler vindprofilet i højden på et bestemt sted, så er det altså påvirket af hvilke overflader vinden har været hen over inden den nåede frem til stedet. Vinden tæt på jorden er mest påvirket af den overflade der er tæt på stedet og højere oppe er vinden påvirket af den overflade den blæste hen over nogle kilometer længere opstrøms (i den retning vinden kommer fra). Hvis landskabet er meget homogent, så bliver vindprofilet med højden også homogent, da vinden ikke oplever nogen ændringer i opbremsningen ved overfladen og derved opstår det klassiske og velbeskrevne logaritmiske vindprofil.

Størrelsen af opbremsningen er forskellig for forskellige typer af overflader alt efter hvor ru overfladen er. På en meget glat overflade, som f.eks. vand, is og sne er opbremsningen lille og modsat over skov og byer er opbremsningen meget stor. Hvis landskabet skifter meget imellem forskellige overflader med forskellig ruhed, så bliver det vertikale vindprofil meget komplekst med mange uforudsigelige knæk i forhold til det velkendte logaritmiske vindprofil.

Andre effekter – Terræn, atmosfærisk stabilitet og store konstruktioner

Vindprofilet i højden bestemmes ikke alene af den mekaniske opbremsning, som det er beskrevet ovenfor. Hvis terrænet ikke er fladt, så vil bakker og bjerge betyde at vinden presses sammen og vindhastigheden forøges på toppen af bakkerne.

Vindprofilet påvirkes også termisk pga. forskelle i overfladernes temperatur. Hvis solen skinner på en overflade og den bliver meget varm, så stiger den varme (lette) luft opad og skaber en ustabil atmosfære. Modsat vil en meget kold overflade (f.eks. udstråling på en stjerneklar nat) give en kold tung luft der bliver liggende ved overfladen og skaber en stabil atmosfære.

Enkeltstående store konstruktioner, som master, bygninger, højhuse, kraftværker og vindmøller bremser selvfølgelig også vinden og påvirker vindprofilet bagved disse.

Samlet set er vindprofilet et givet sted på kloden altså meget komplekst og sammensat af en lang række af forskellige påvirkninger, som beskrevet ovenfor.

Turbulens i vinden

Udover middelvindhastigheden så er det også vigtigt at forstå hvor konstant vinden blæser eller hvor meget den varierer, dvs. om der er den samme vindhastighed hele tiden eller der er mange vindstød. Dette kaldes turbulens i vinden og turbulensintensiteten er forholdet imellem standardafvigelsen og middelvinden. Over en homogen og glat overflade, som havet er turbulensen lav og over et blandet landskab med skiftevis land og skov er turbulensen meget høj.

Hvor meget energi producere en vindmølle?

En vindmølle er jo en stillestående ”vindhøster”, som kun kan høste den vind der kommer hen til den. Når man på en prøvestation skal bestemme hvor god en ny vindmølle er til at udnytte vinden, så er det derfor helt centralt, at have maksimal kontrol over og forståelse af den vind, der kommer hen til vindmøllen. Derfor er det vigtigt at have så homogene og velbeskrevne forhold som muligt på en prøvestation for vindmøller. Hvis ikke vi forstår vinden på stedet rigtigt, så kan vi af den grund fejlvurdere effektiviteten af vindmøllen, hvilket efterfølgende kan have fatale konsekvenser for vindmølleproducenten.

Værdien af en effektkurvemåling på en prøvestation et sted i verden afhænger af om forholdene er reproducerbare. Altså hvis den samme mølle er blevet testet i USA eller Kina, så skal resultatet blive det samme. Reproducerbarhed

er kernen i behovet for kontrollerede og veldokumenterede forhold med et minimum af komplicerende forhold opstrøms i den dominerende vindretning.

Kan en vindmølle holde?

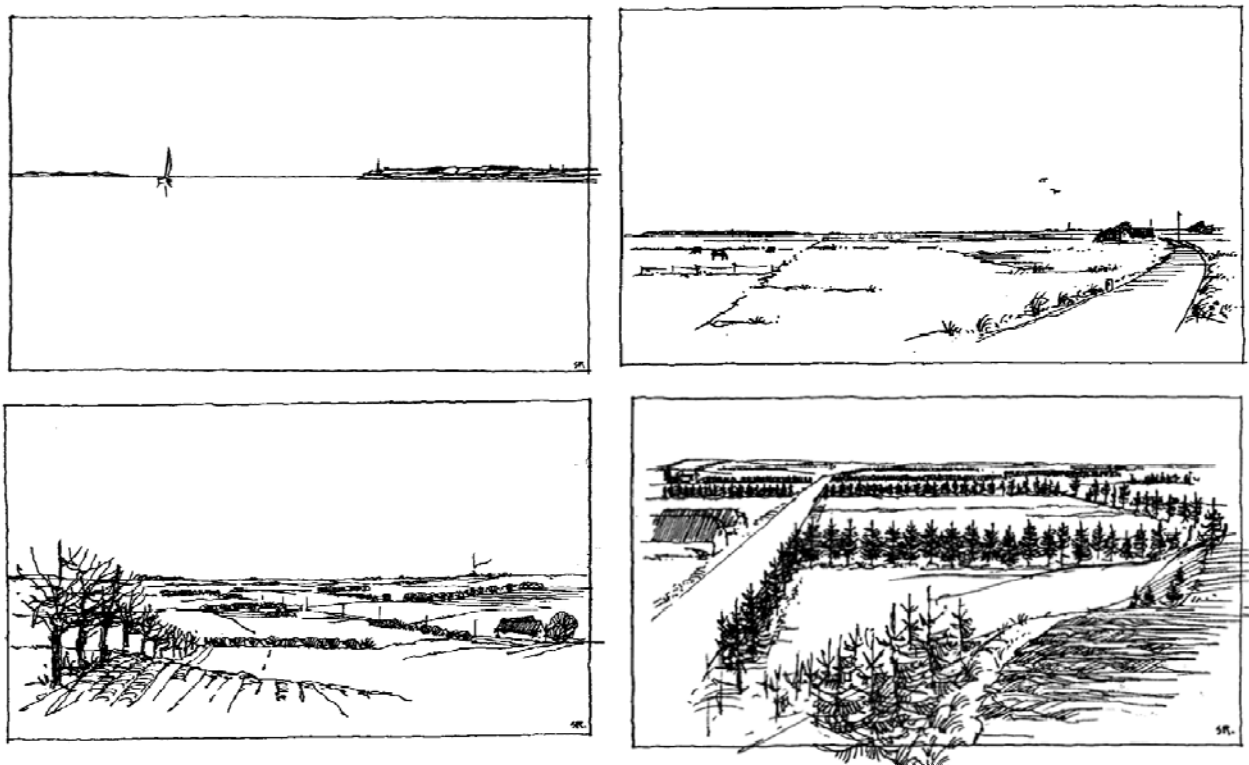
Når en vindmølle høster vind, så bremser den vinden og omsætter energien til elektricitet. Denne opbremsning omsætter meget store kræfter fra mekanisk energi og betyder at alle dele af en vindmølle skal kunne holde til disse store kræfter i møllens planlagte levetid, som typisk er 20 år. Disse laster undersøges også på en prøvestation. Lasterne på møllen er store når der er turbulens, så på en prøvestation er lidt turbulens godt, men ingen turbulens eller for meget turbulens er skidt. Lidt variation med nogle stød i vinden er godt for at kunne teste de belastninger en vindmølle skal kunne holde til i dens levetid. Hvis der er for meget turbulens så bremser det vinden for meget og middelvinden bliver for lav.

Om begrebet ”ruhed” af et terræn

Ruheden hen over et terræn kan beskrives, som den samlede opbremsning af vinden pga. af alle de genstande, der er på overfladen (afgrøder, træer, bygninger osv.). Forskelligt terræn har derfor forskellig ruhed og der er samlet i ruhedsklasser fra ruhedsklasse 0 til ruhedsklasse 3.

Tabel 1: De forskellige ruhedsklasser i forskellige typer af terræn. Kilde [6]

Ruheds klasse	Terræn typer	Turbulens typisk (%)
0	Alle vandoverflader – glat sand – glat sne	5
1	Åbent land – få bygninger og træer	10
2	Tæt landskab – flere bygninger, træer og buske	15
3	Byer, forstæder, skov og høje læbælter	20



Figur 1: Billeder med eksempler på forskellige ruhedsklasser: Øverst tv. ruhedsklasse 0 - Øverst th. ruhedsklasse 1 - Nederst tv. ruhedsklasse 2 og Nederst th. ruhedsklasse 3. Kilde [5] og [6].

De forskellige ruhedsklasser skaber forskellige vindforhold over de forskellige typer af terræn. Udover at ruhedselementerne bremse middelvinden, så har det også stor indflydelse på den turbulens der skabes i vinden. Jo mere ruhed – jo mere turbulens.

Turbulens Intensiteten (TI) er defineret i procent, som standardafvigelsen af vinden divideret med middelvinden over en tidsperiode, på typisk 10 minutter. I Tabel 1 er vist nogle typiske størrelser af Turbulens Intensiteten, for de forskellige ruhedsklasser.

Ligesom middelvinden ændre sig med højden over overfladen, så gælder det også for turbulensen. På et vindmølle testcenter er idealet, at turbulensen er så homogen som muligt over vindmøllens rotorareal og gerne i størrelsesordenen imellem 10% og 15% i Turbulens Intensitet. Dette svarer til terræn med ruhedsklasse 1 til 2 og forklarer hvorfor vandoverflader (ruhedsklasse 0) skovområder (ruhedsklasse 3) ikke egner sig til at måle effektkurven på nye prototypevindmøller.

2 Krav til vindforhold på testpladsen

2.1 Test af vindmøller foretages efter internationale standarder

Udgangspunktet for eTabelringen af prøvestationen ved Østerild har fra starten været at vindforholdene skulle være i overensstemmelse med de internationale standarder. Og ifølge de internationale standarder skal der være et frit vindfelt, dvs. ingen ruhedsskift og ingen pludselige ændringer af terræn overfladen, ud på en afstand svarende til 20 gange rotordiameteren. Med vindmøller på op til en højde på 250 meter og rotordiameter på 200 meter er konsekvensen at vindfeltet 4 km foran vindmøllerne skal være frit, og derfor er der i første omgang udlagt et vindfelt på 4 km fra pladserne, hvor vindmøllerne planlægges opstillet, som "worst-case" scenario for skovrydning.

Fordi der er behov for et homogent vindfelt, må man begrænse eTabelringen af nye høje genstande. Det berørte område rækker længere ud end kombinationen af vindfelt og testområde. Der indføres derfor en beskyttelseszone på 6 km foran testcenteret og på 3 km bag ved testcenteret, hvor der ikke må opstilles vindmøller eller opføres meget høje bygninger med mindre det er afklaret, at det ikke vil kunne påvirke målingerne på testcenteret.

Det blev i forbindelse med gennemgangen af kravene til vindfeltet i henhold til internationale standarder, i enighed mellem Vindmølleindustrien og Risø DTU, besluttet at gennemføre mere detaljerede studier af vindfeltet foran vindmøllerne. Formålet skulle være, at sikre at kravene til skovrydning baserer sig på et så sikkert grundlag som muligt. Studierne skulle både basere sig på modellering af vindforholdene i det aktuelle landskab og måling af vindforholdene i området.

De internationale standarder sikrer, at hvis målinger gennemføres efter standarderne, accepteres de af aktørerne på markedet. Formålet med standarderne er at sikre at målingerne er reproducerbare og uafhængige af tid og sted herunder gennem international sporbarhed af kalibreringer at sikre at nationale afvigelser undgås. Standarderne sikrer både et niveau for nøjagtigheden og usikkerheden.

Standarderne understøttes af, at der mellem landene i bl.a. Europa er akkrediteringssystemer med gensidig anerkendelse af metoderne. I Danmark varetages denne funktion af DANAK.

Dokumentationen af, at målepladser lever op til kravene i de internationale standarder, har afgørende betydning for tilliden til målingerne. Derfor er det vigtigt gennem teoretiske beregninger og målinger i området hvor teststationen eTabelres ved Østerild, at dokumentere at vindforholdene på teststationen med stor sandsynlighed giver mulighed for reproducerbare målinger med høj kvalitet i hele det relevante vindhastighedsområde. Dokumentationen skal sikre at målingerne kan anerkendes på markedet.

I den danske bekendtgørelse vedrørende godkendelse af vindmøller anvendes de internationale standarder som grundlag for godkendelsen af vindmøller herunder i forbindelse med fuldskalatest af nye vindmølle typer. Vi giver i det følgende afsnit en oversigt over de vigtigste internationale standarder der anvendes i den danske godkendelsesordning.

Grundlaget for godkendelse af vindmøller

Grundlaget for målinger på vindmøller er baseret på bekendtgørelse nr. 651 af 28. juni 2008 om teknisk godkendelsesordning for konstruktion, fremstilling, opstilling vedligeholdelse og service af vindmøller, Energistyrelsen:

<http://www.dawt.dk/Common/Bekendtg%C3%B8relse%20651%20lovtidende%20udgave.pdf>

I bekendtgørelse nr 651 stilles krav om at godkendelser gennemføres i henhold til gældende internationale standarder i IEC61400-serien. I forbindelse med godkendelser er den gældende internationale tekniske anvisning WT01 IEC System for Conformity Testing, som fastlægger krav og procedurer for udførelse af vurderinger og efterprøvninger af vindmøllers sikkerhed, kvalitet, ydeevne, støjudsendelse, påvirkning af spændingskvaliteten på elnettet mm.

Effektkurvemålinger

I forbindelse med effektkurvemålinger er den gældende internationale standard:

IEC61400-12-1, Wind turbines – Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines, First edition 2005-12, <http://www.iec.ch>

Risø DTU er akkrediteret til at lave effektkurvemålinger af DANAK, og indgår i et internationalt branche-netværk, MEASNET, som har til formål at lave sammenlignende afprøvninger og kalibreringer, samt sørger for at tolke standarderne ens. MEASNET udgiver dokumenter der præciserer fortolkning af IEC61400-standarderne:

MEASNET Power Performance Measurement Procedure, Version 4, November 2006

(http://www.measnet.org/powerperformance_nov_2006_version_4.pdf)

Endvidere måles der ofte efter en tysk standard:

Technische Richtlinien für Windenergieanlagen, Teil 2: Bestimmung von Leistungskurve und standardisierten Energieerträgen, Revision 15, Stand 01.05.2008. Fördergesellschaft Windenergie e.V.

Lastmålinger

I forbindelse med lastmålinger er den gældende internationale standard:

IEC61400-13 – Measurement of mechanical loads. <http://www.iec.ch>

Støjmålinger

Støj fra vindmøller måles efter bekendtgørelse nr. 1518 af 14. december 2006 om støj fra vindmøller.

Bekendtgørelsen henviser til den gældende internationale standard:

IEC61400-11 – Acoustic noise measurement techniques. <http://www.iec.ch>

El-kvalitetsmålinger

I forbindelse med el-kvalitetsmålinger er den gældende internationale standard:

IEC61400-21 – Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines. <http://www.iec.ch>

2.2 Ønsker til vindhastighed og turbulens

Som beskrevet ovenfor, så er de problemstillinger, der omhandler, hvordan man skal måle effekten fra elproducerende vindmøller beskrevet i IEC-61400-12-1 First Edition 2005-12. Det er måling af effekten fra vindmøllerne, som stiller de største krav til området omkring et testcenter. Omkring teststedet står der i IEC-61400-12-1, at man specielt skal være opmærksom på: Topografi, andre vindmøller og forhindringer ("obstacles") som bygninger, træer og lign. Det er således et problem med mange skift imellem skov og åbent land.

Egnede landområder:

- Det er nødvendigt med kraftig vind for at få store belastninger på møllen, således at møllen som helhed kan afprøves grundigt under hårde betingelser. (*Årlig middelvind > 8 m/s i 100m*)
- Prototyper skal opstilles i områder, hvor terrænet ikke må have indflydelse på målingerne Dvs. at der ønskes en enkel topografi. (*Helst fladt landskab*)
- De bedst egnede arealer er åbne vestjyske terræn med en regelmæssig landskabsruhed (*Homogent vindfelt*)
- Landskabsruheden skal sikre en homogen turbulens således at turbulensintensiteten (variationen i vindhastig over 10 minutter) der ligger fra 9 til 14 %.

3 Meteorologisk modellering af vinden

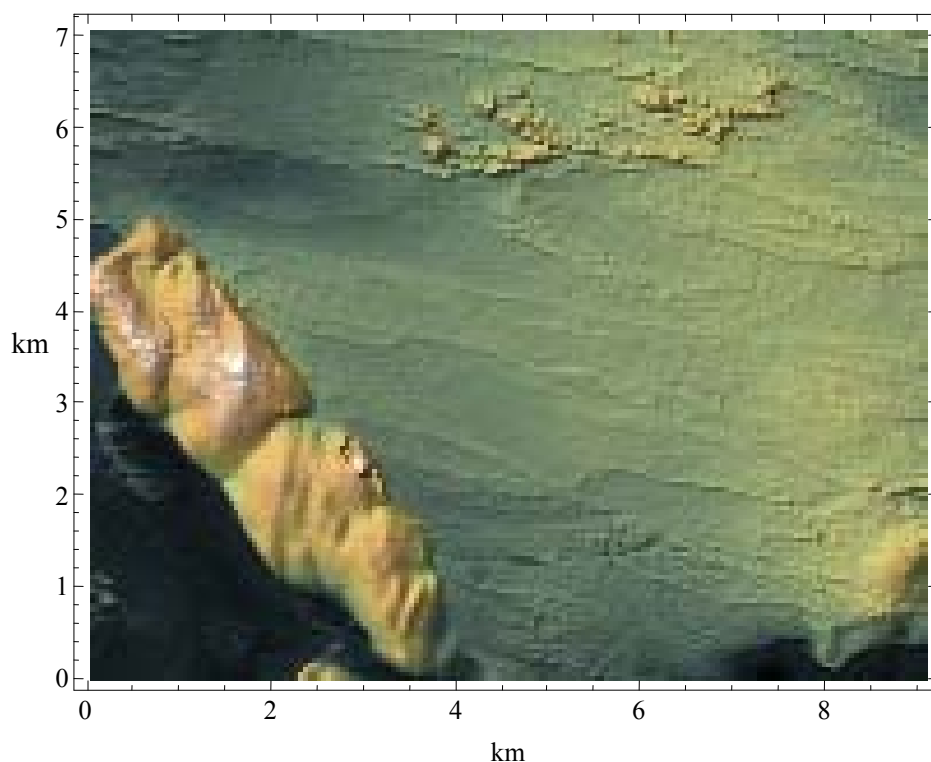
Formålet med modellering er at beregne vindprofiler og turbulens ved de syv prøvestande og masterne vest for dem ved forskellige mulige fremtidige skovrydninger for derigennem at kunne vurdere effekten på standenes anvendelighed. Dette gøres ved hjælp af modellen SCADIS, som er beskrevet nedenfor.

3.1 Kort beskrivelse af modellen SCADIS

SCADIS er en atmosfærisk grænselagsmodel, som er baseret på tidsmidlede bevægelsesligninger, de såkaldte Reynolds midlede Navier-Stokes ligninger, som oftest bruges til tekniske strømningsberegninger. Den er specielt udviklet til at beregne strømninger over skovrigt terræn, og indeholder, udover ligningerne for luftens bevægelse, beskrivelser af luftens fugtighed og varmeindhold, samt indvirkningen af Jordens rotation på luftens bevægelser. Træer eller skov modelleres som en modstand mod luftens bevægelse. Den kraft træerne udøver på luften, er modsat rettet vinden, og størrelsen er, som det almindeligvis antages, proportional med kvadratet på vinden størrelse, og proportionalitetskonstanten har at gøre med tætheden af blade, kviste og grene. Kraften virker over hele skovens højde, men er hovedsagligt koncentreret i kronelaget, hvor tætheden af nåle eller blade er højest. Modellen SCADIS er beskrevet i detaljer i [2,3,4], hvor den også er blevet sammenlignet med både vindtunnelundersøgelser af strømninger over modelskove og målinger i naturen foretaget af mange institutioner, inklusive Risø DTU [4]. Modellen er nok en af de bedste i verden til formålet, men som alle andre modeller så er der usikkerheder knyttet til resultaterne, hvorfor det er vigtigt at lave målinger for at verificere resultaterne og eventuelt reducere usikkerheden.

3.2 Sammendrag af modelkørsler

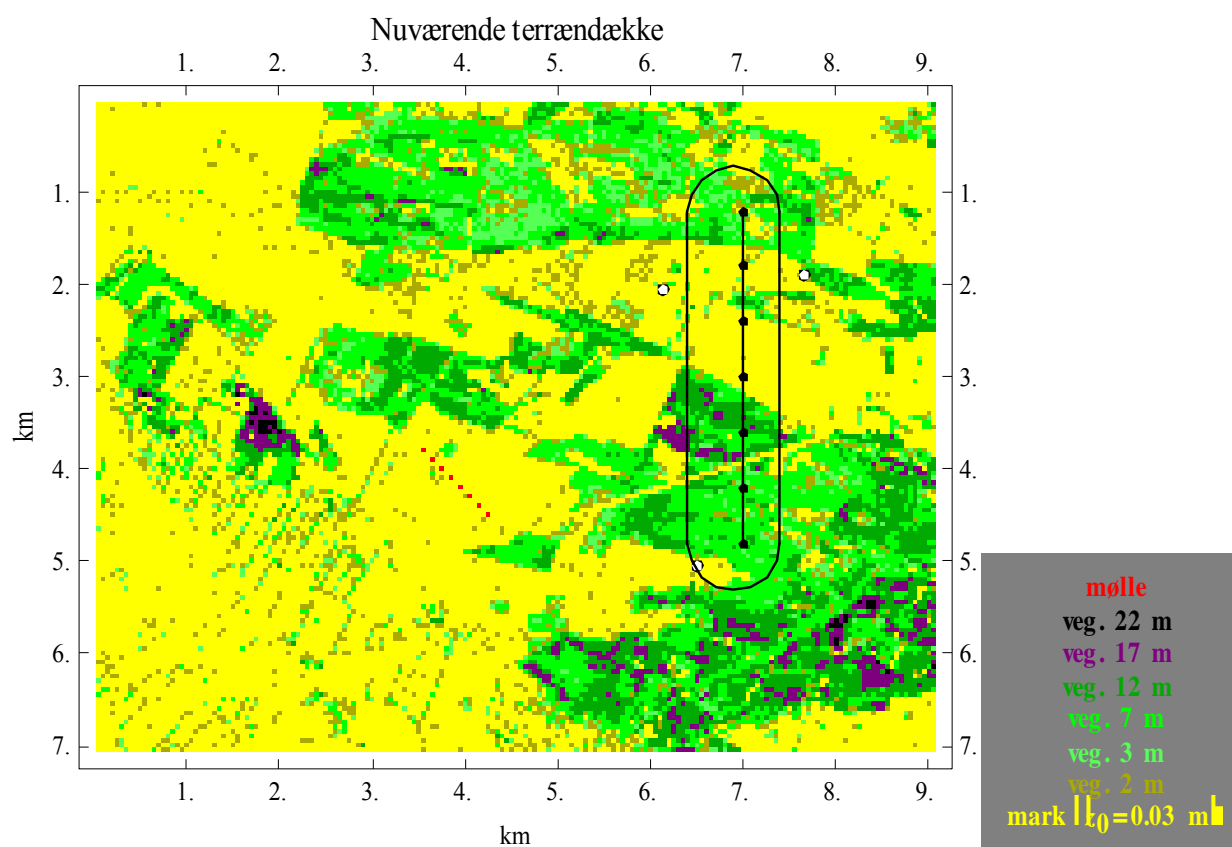
For at udføre beregninger behøver SCADIS terræn- samt vegetationshøjder og profiler af bladtætheden i områderne med vegetation. De to første fås fra Danmarks Højdemodel, som er udarbejdet af Kort & Matrikelstyrelsen. Terrænhøjder med og uden vegetation leveres med en horisontal opløsning på 1,6 meter, hvilket er mere end rigeligt for SCADIS, som i vores beregninger bruger en horisontal opløsning på 50 meter. Hele beregningsdomænet er 7 gange 9 km og er vist på Figur 2. Terrænet er temmelig fladt bortset fra en bakkeø mod sydvest ved Hjørdemål og nogle overgroede klitter mest koncentreret mod nord.



Figur 2 Højdekort af hele beregningsområdet brugt i SCADIS. Højderne varierer fra 0 til 35 m.

Træhøjderne på Figur 3 viser større sammenhængende skovområder mod sydøst og nord, hvor skoven i sydøst er markant højere end i nord. Der er mindre sammenhængende områder i midten af domænet samt et område mod vest på bakkeøen med specielt høje træer, vistnok et gammelt militærområde. Udover træerne er der vist de otte

NEG Micon møller lidt sydvest for midten, som også indgår i beregningerne. De er modelleret som store træer således at den mod vinden rettede kraft matcher møllernes drag ved typiske vindhastigheder. Figur 3 viser også positionen af de syvprøvestande (sorte prikker) samt de tre vindfjernmålere (lidars) som hvide prikker.

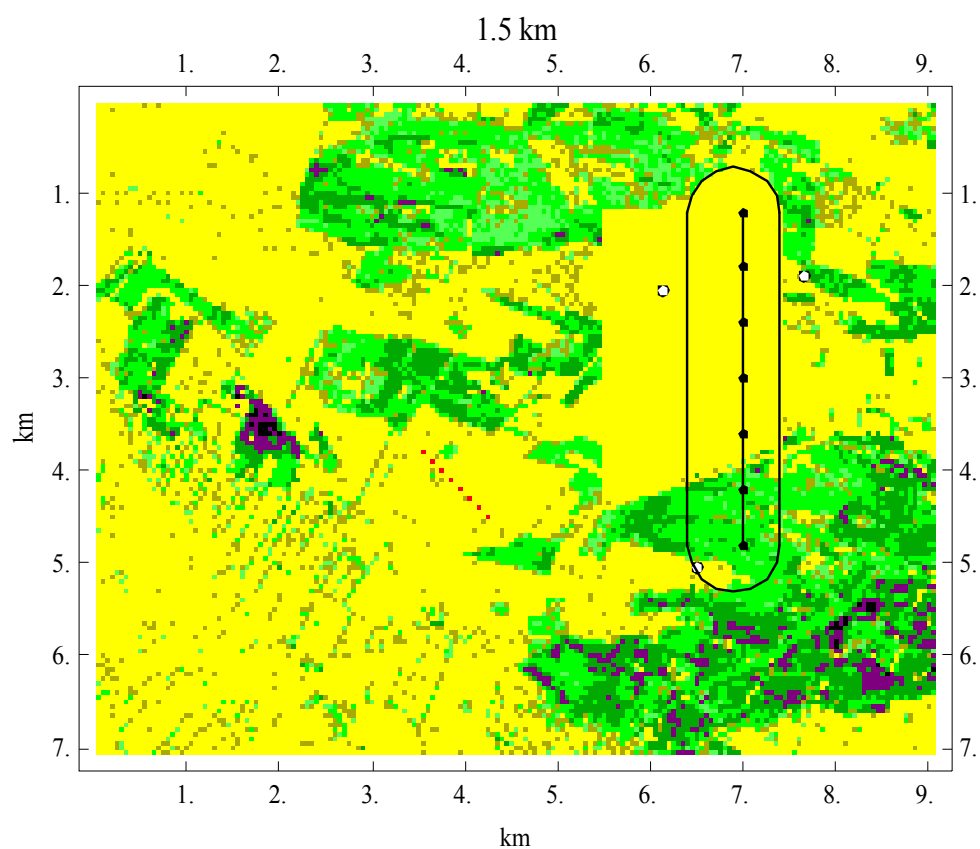


Figur 3 Højder af vegetation og møller i området. De syv møllestande er vist som sorte prikker, mens de tre lidars er vist som hvide prikker. Stander er nummereret 1 til 7 fra nord.

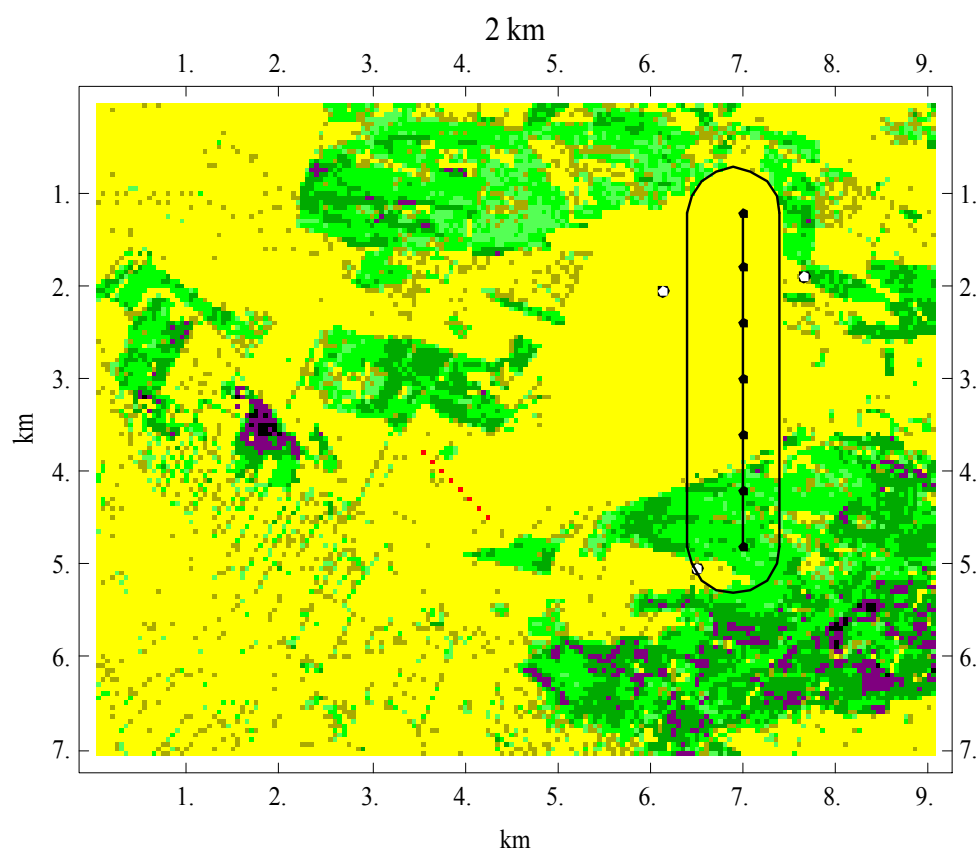
Som nævnt er den horisontale opløsning af beregningsdomænet 50 m, og det er den over hele domænet både i nord-syd og øst-vest retningerne. Vertikalt er beregningsnettet tættest ved jordoverfladen, hvor der er 10 beregningspunkter under fire meter. Derefter er der et punkt per meter op til 34 meter, hvorefter nettet bliver grovere med 29 op til domænets top i 2200 m, i alt 70 beregningshøjder.

Vi har kørt modellen med syv forskellige mulige skovrydninger. De tre vigtigste som er omtalte i dette rapport er vist på Figur 3, Figur 4 og Figur 5, som er ”nuværende vegetation”, ”rydning ud til 1,5 km” og ”rydning ud til 2,0 km”, hvor de to sydligste stande ikke ryddes op til den skrå linje defineret ved højspændingsledningen. Alle rydningsscenarier er kørt med geostrofvindsretninger¹ fra 240 grader til 360 grader i skridt af 15 grader, svarende til overfladevindretninger fra cirka 210 til 330 grader, hvilket skulle dække ”vindfeltet”. Modellen er kørt uden hensyntagen til atmosfærisk stabilitet og med den samme, typiske geostrofvindshastighed fra alle retninger. Det tager cirka en dag til at beregne hvert rydningsscenarie.

¹ Geostrofwind er den vind i beregningsdomænet’s top.



Figur 4 Vegetationshøjder brugt i SCADIS ved en rydning ud til 1.5 km vest for møllerækken begrænset mod syd af rydningen ved højspændingsledningerne.

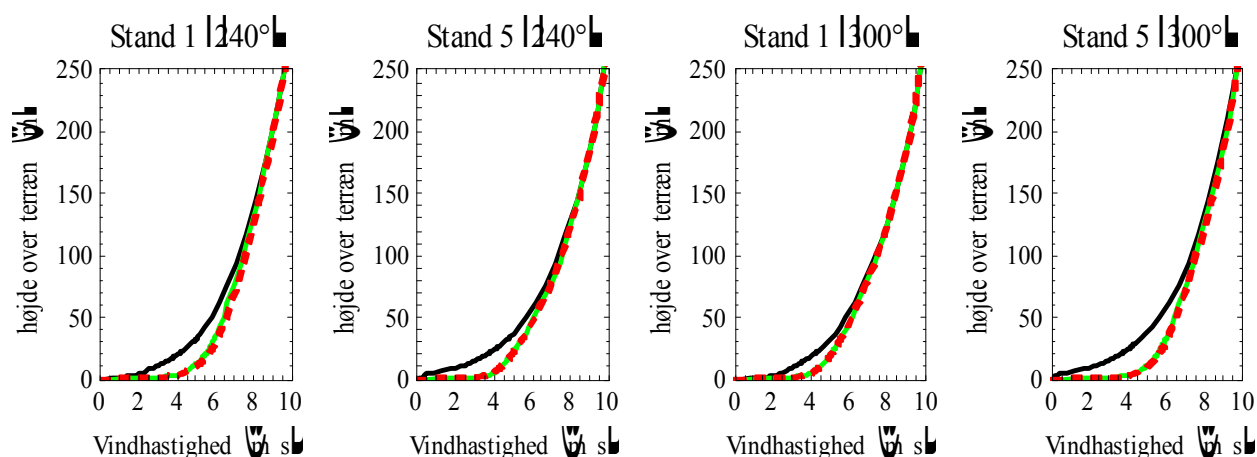


Figur 5 Samme som ovenfor, men med rydning ud til ca. 2 km.

3.3 Resultater fra modelkørsler

Vindprofiler

På Figur 6 vises vindprofiler fra udvalgte retninger. Det er meget tydeligt, at i højder over hundrede meter påvirkes vindprofilen meget lidt, mens det bliver betydeligt fladere (vindhastigheden varierer mindre med højden) under hundrede meter. For at kvantificere dette kan man se på "shear", dvs. $\Delta U / \Delta z$, hvor ΔU hastighedsforskellen mellem to højder z_1 og z_2 , og Δz er $z_2 - z_1$. For stand 1 og en geostrof vindretning på 240° og for højderne $z_1 = 50$ m og $z_2 = 100$ m viser beregningerne, at shearet falder med 31 % for fældning ud til 1,5 km og 36 %, hvis der fældes ud til 2 km. Hvis vi ser på større højder, $z_1 = 100$ m og $z_2 = 200$ m, er shearet kun reduceret med henholdsvis 11 og 17%. For stand 5 for den samme retning reduceres shearet for de to rydningsscenarier næsten lige meget både for de mindre højder (20%) og de større højder (8%). For en geostrofvindsretning på 300° er situationen ved stand 1 igen at der næsten ikke er forskel på reduktionen i shear mellem 1,5 og 2 km rydning. Shearet i lavere og højere højder bliver reduceret med henholdsvis 14% og 5%. Endelig bliver shearet reduceret med godt 40% og 10% for stand 5 (retning 300°) for mindre henholdsvis højere højder.



Figur 6 Variation af middelvinden med højden. Sort er uden skovrydning, grøn: rydning ud til 1,5 km og rød/stiplet rydning ud til ca. 2 km.

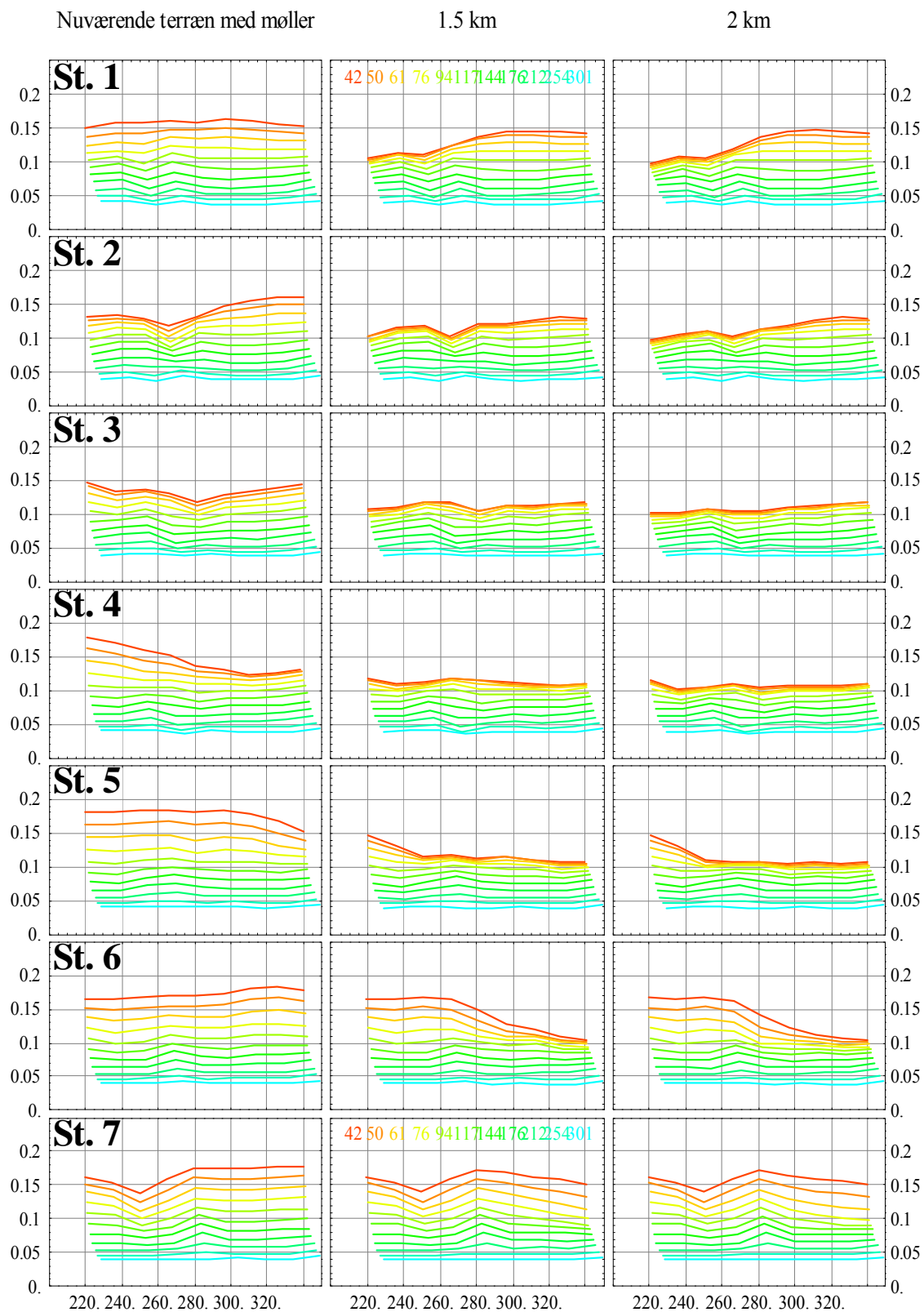
Disse tal viser, hvor man stadig må huske på de mange usikkerheder i modellen, at ved rydning reduceres shearet kraftigt, specielt for de mindre højder, men at man ikke vinder meget ved at gå fra 1,5 km til 2 km.

Turbulens

Nu vender vi os mod de modellerede turbulensintensiteter. Turbulensintensiteten er som tidligere nævnt, defineret som standardafvigelsen af vindhastigheden σ divideret med middelvindhastigheden U , altså $TI = \sigma / U$ (2). Det man sigter mod er, at få en relativt jævn fordeling af turbulens, både som funktion af højden og funktion af vindretningen. Dette er vist på Figur 7, hvor der er tre søjler svarende til den nuværende vegetation, rydning ud til 1,5 km og rydning ud til 2 km, og hvor hver række svarer til en møllestand. På hvert plot er den beregnede turbulensintensitet vist som funktion af vindretningen. Den rødeste kurve er resultatet for 42 meter over terrænet mens de mest blå kurver i 301 meter. Generelt daler turbulensintensiteten med højden, og den er meget højere tæt på jorden i venstre søjle (ingen rydning). For stand 1 (øverste række) ses, at for retninger mindre end cirka 280° falder turbulensintensiteten kraftigt under 100m, når skoven ryddes ud til 1,5 km, og den varierer meget mindre med højden, hvilket er en god ting for testningen af møllerne. Generelt ses en ret lille forskel på at rydde ud til 1,5 km og ud til 2 km. Rydningen influerer stort set ikke stand 7, hvilket følges af at der ikke ryddes træer syd for stand 6.

Modelleringen kan også bruges til at beregne hvor stor forskel, der er i vinden på møllerne og på opstrømsmasterne, som kommer til at stå maksimalt 500 meter vest for møllestandene. For eksempel kan der, hvis der ikke ryddes skov, for visse vindretninger være op til fem procents forskel på vinden ved stand 5 og den foranstående mast. Dette vil vanskeliggøre måling af effektkurver, men for rydninger ud til halvanden kilometer reduceres disse forskelle til under én procent. Dette er også en meget vigtig grund til at det er nødvendigt at rydde skov.

2 Nogen gange er TI udtrykt som %, andre gange som simpelt tal (f.eks 11% eller 0,011).



Figur 7 Beregnet turbulensintensitet som funktion af retning (horisontal akse) og højde (givet ved farven) for de syv standpositioner (st. 1 til st. 7). De tre søjler svarer til nuværende vegetationsdække, ryddet ud til 1.5 km og ryddet ud til 2 km, henholdsvis. Forskellig farve indikerer forskellige højde, fra 42m (rød) til 301m (lyse blå).

4 Beskrivelse af de udførte målinger

4.1 Formålet

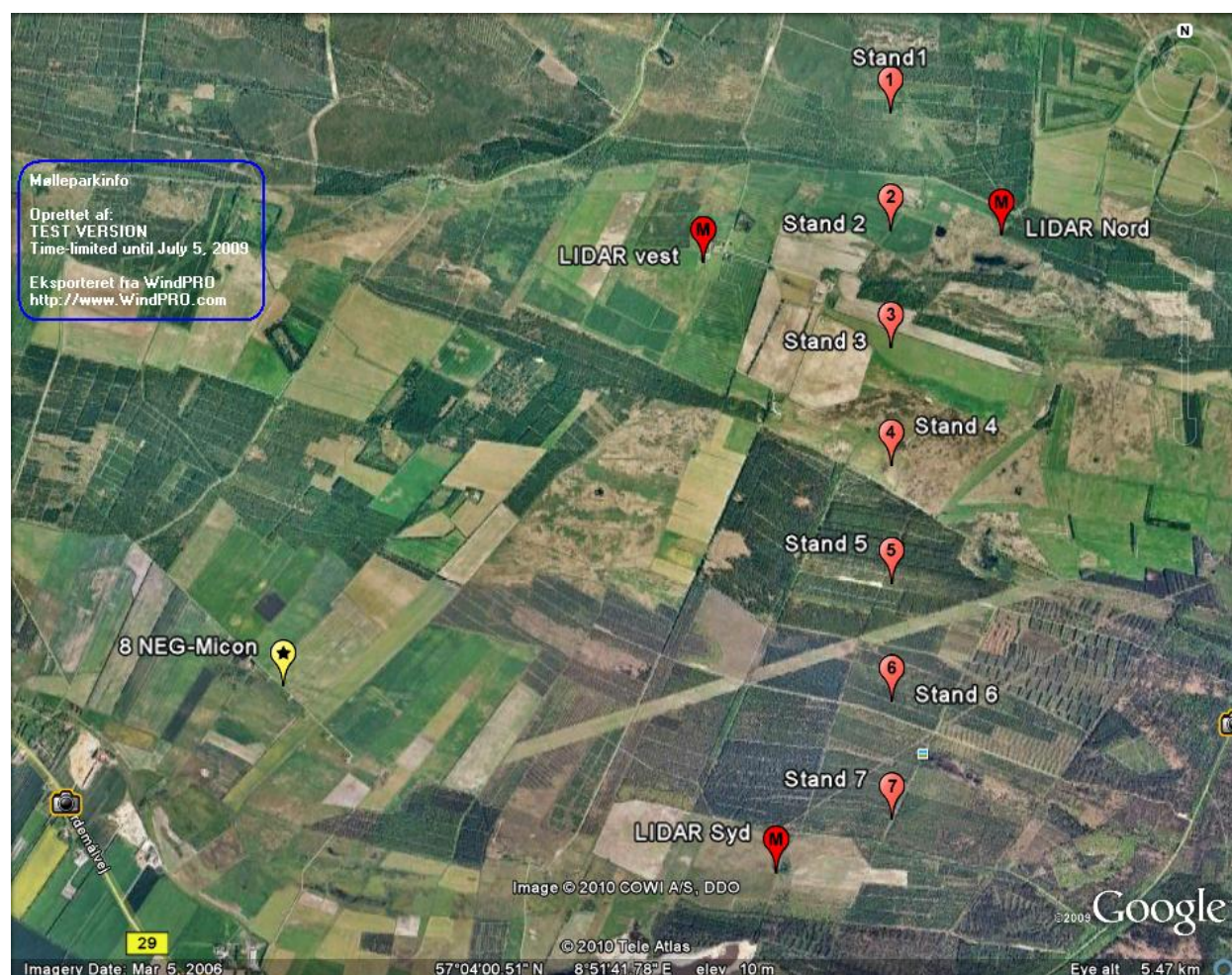
Hovedformålet med målingerne er at undersøge vind og turbulensforholdene på forskellige positioner og i flere højder i området. Dette skal føre frem til et veldokumenteret beslutningsgrundlag for hvor stort omfanget af rydning af skov i testområdet og i vindfeltet behøver at være. Især er man interesseret i turbulens og vind shear (ændring af vindhastighed med højde) som funktion af afstand til skovkant (mast og mølle).

4.2 Valg af målepositioner

Tre målepositioner blev udvalgt på baggrund af en foreløbig modellering og en besigtigelse af området i december 2009. Den overordnende ide var at finde målepositioner i hver ende af møllelinjen samt en position opstrøms, dvs. vest for møllelinjen. Valg af målepositioner var begrænset til den statsejede jord. Hver position skulle præstere, så vidt som muligt, uhindrede strømninger i de vigtige vindretninger sådan at muligheden for målefejl var begrænset så meget som muligt. Koordinater af de tre valgte positioner er givet i Tabel 2 og vist i Figur 8.

Tabel 2 Koordinater af målepositioner.

Station navn	Breddegrader	Længdegrader
Lidar Vest	57.077500° N	8.868104° E
Lidar Nord	57.078753° N	8.893373° E
Lidar Syd	57.049582° N	8.874279° E

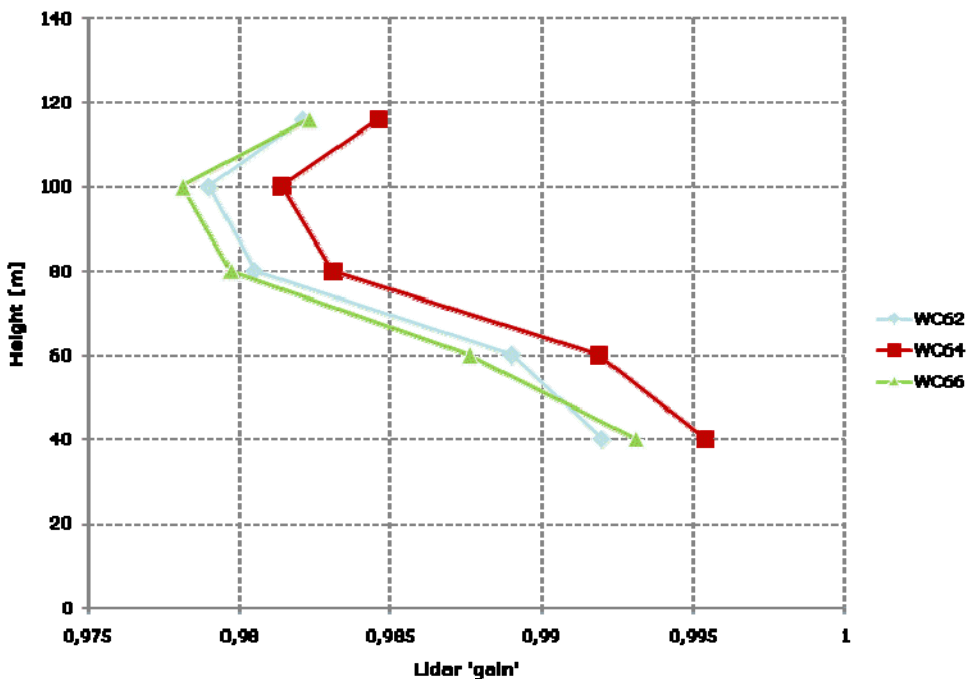


Figur 8 Google Earth image af de 3 lidar målepositioner og møllerækken med de 7 møllestande.

4.3 Instrumenter

Der er blevet anvendt 3 lidar (Light Detection And Ranging) instrumenter af typen WLS-7 fra den fransk fabrikant Leosphere. En lidar måler vindhastighed ved at sende laser lys op i luften i en skrå vinkel. Lidt af lyset bliver reflekteret tilbage fra små partikler i luften (aerosoler) og fordi partiklerne bevæger sig i vinden, bliver den reflekterede lysets frekvens (farve) ændret en smule. Man er i stand til at måle frekvensændring ret nøjagtig og det giver partiklernes og derfor vindens hastighed. Fordi lyset er sendt som pulser, er man også i stand til at detektere vindhastighed i forskellige højder over jorden. Her anvendes de forskellige transittider, som er gældende for lyset til at bevæge sig fra instrumentet op til en bestemt højde og tilbage igen. Jo længere lyset skal rejse, jo længere tid går det før den detekteres tilbage ved lidaren. WLS-7 Lidar'en kan måle vindhastighed (og retning) i op til 10 forskellige højder, formelt mellem 40 og 200m. Den øvre grænse for målehøjden er bestemt af hvor mange aerosoler der er i luften på et givet tidspunkt og kan variere markant. Ved Østerild målingerne er der anvendt ti målehøjder: 45, 60, 80, 100, 120, 140, 170, 200, 250 og 300m med den forventning, at det ikke altid er muligt at nå de højere niveauer. Måletilgængelighed som funktion af højden er vist i Figur 17.

Nøjagtigheden af lidar målinger er blevet eftervist inden Østerild kampagnen ved at lave sammenligning af simultant kopanemometer og lidar målinger ved en 116m meteorologimast ved Prøvestationen i Høvsøre [1]. Disse målinger viser at middelvindhastighed i samtlige fem test målehøjder maksimalt varierer cirka 2% fra kopanemometer målinger. Figur 9 viser den såkaldt 'gain' fra lineær regressioner af simultant lidar og kop målinger for de 3 lidars i 5 forskellige målehøjde.



Figur 9 Forhold mellem kopanemometre og lidar vindhastighed ('gain') for de 3 lidar som funktion af testmålehøjde fra Høvsøre målinger.

Som supplement til lidar målingerne, blev to 45m høje målemaster installeret ved Vest og Syd målepositionerne. Disse master var instrumenteret med soniske og kop anemometre sådan at vindprofilen i de første 40m også er tilgængelig for senere analyse idet lidaren kan ikke måle under denne højde. Udover instrumenter for vindhastighed og retning var masterne instrumenteret med sensorer til måling af temperatur, regn, fugtighed og stråling.

Ved at anvende soniske anemometre som kan måle både 3D vindhastighed samt temperatur, er det muligt at beregne varmefluksen, som er bestemmerne for grænselag's stabilitet. Dette er en meget vigtig parameter når vindhastigheds profiler skal kategoriseres og skal anvendes ved senere sammenligninger af modelberegninger og målinger. På denne måde ville Østerild målinger danne et vigtigt dataset, som kan bruges til forbedringer af modeller for strømning ved skovområder. I mellemtiden fortæller vores målinger meget præcis om de aktuelle vindforhold ved Østerild som man i fremtiden vil blive bedre til at forudse ved hjælp af de forbedrede modeller.

The drawing shows two side-view diagrams of masts, Mast 1 (North) and Mast 2 (South), with various sensors mounted at different heights. Mast 1 has sensors at 1.5m, 2.5m, 4.5m, 15m, 25m, 40m, and 45m. Mast 2 has sensors at 1.5m, 2.5m, 4.5m, 10m, 20m, 40m, and 45m. A legend on the right lists the sensors: RSB P2549A CLIP ANEMOMETER, P3117A SUPPORT POLE 375, P2916A VECTOR WINDVANE W300P, P3117A SUPPORT POLE 375, METEK USA-1 Series 3D (N non-magnetic orientation incl of boom), RSB P2549A TEMPERATURE SENSOR, RSB P2028 RADIATION SHIELD, P3117A SUPPORT POLE 375, F202GA VISUAL HMP45, F3100C Triax Precipitation sensor, F4001A Sea/Delta Global/Gliding, and F402GA VISUAL PTB10 900-1060 kHz 0-5V AIRPRESSURE. A note at the bottom left specifies mast construction details. A north arrow is shown at the bottom left of each mast diagram.

MAST 1 NORTH

MAST 2 SOUTH

ARRANGEMENT DRAWING

MAST 1 POSITION: xxx xx.xx, xxx xx.xx
 MAST 2 POSITION: xxx xx.xx, xxx xx.xx
 ELEVATION: xx m ASL (GPS HEIGHT)
 CONFIGURATION AS OF 2010-03-19

RSB P2549A CLIP ANEMOMETER
 P3117A SUPPORT POLE 375

P2916A VECTOR WINDVANE W300P
 P3117A SUPPORT POLE 375

METEK USA-1 Series 3D
 (N non-magnetic orientation incl of boom)

RSB P2549A TEMPERATURE SENSOR
 RSB P2028 RADIATION SHIELD
 P3117A SUPPORT POLE 375

F202GA VISUAL HMP45

F3100C Triax
 Precipitation sensor

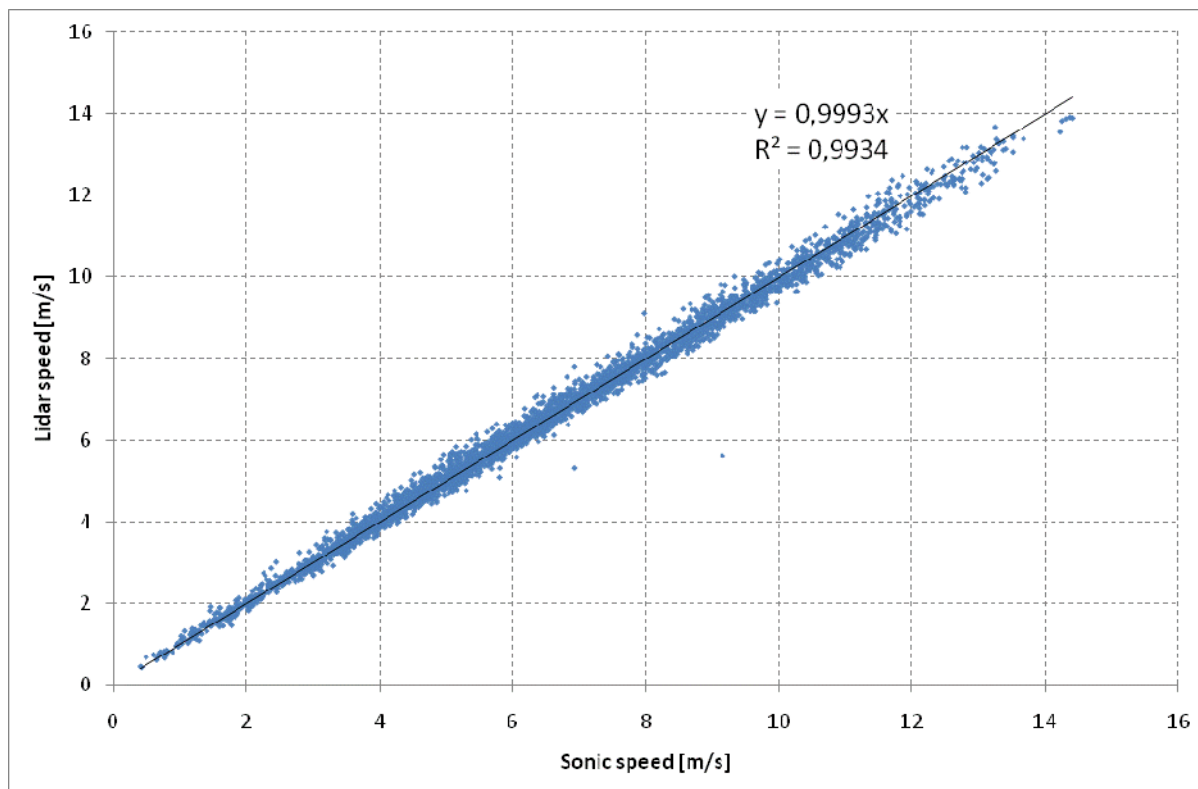
F4001A Sea/Delta
 Global/Gliding

F402GA VISUAL PTB10 900-1060 kHz 0-5V
 AIRPRESSURE. Sea 1, located in enclosure

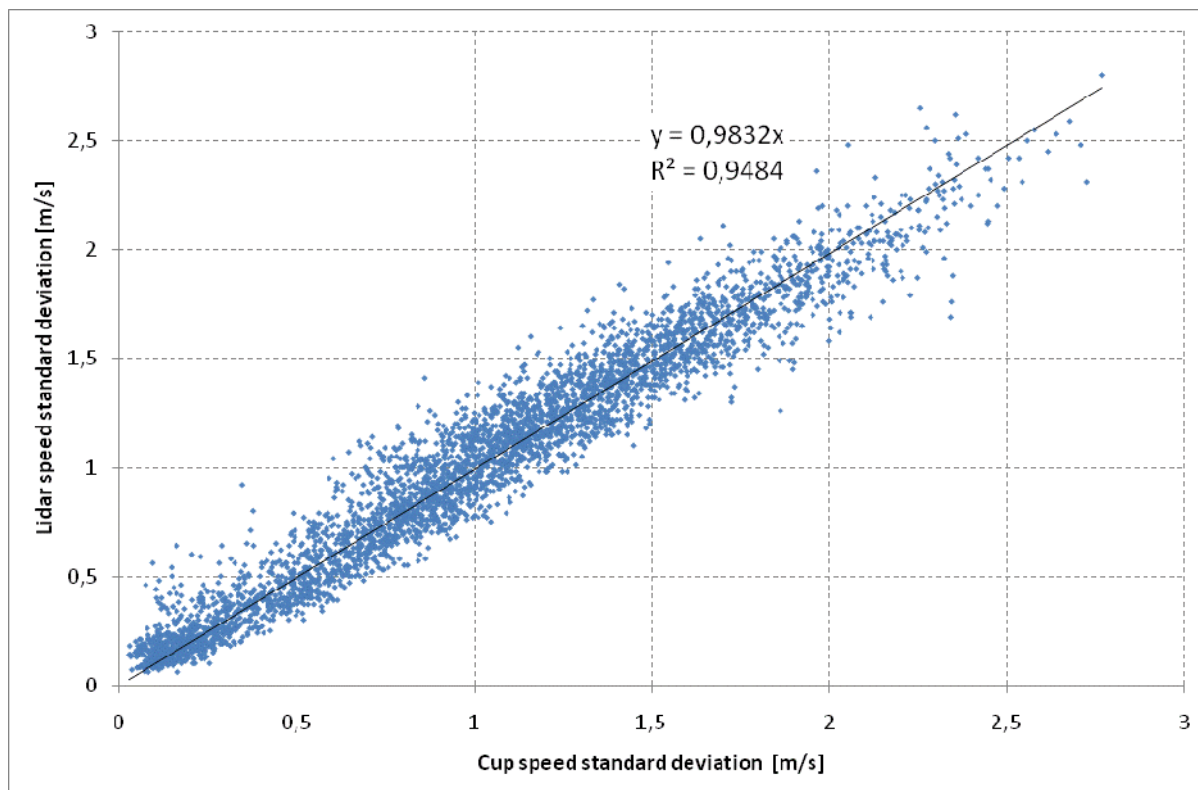
NOTE:
 - Mast 1: Carl C. Surle 2, Hytort, fabricated 308F m. adaptor for 307masts, section 305-305-304-303 used 302 sub-section. Subline sample 7.2m
 - Mast 2: Carl C. Surle 2, Hytort, fabricated 308F m. adaptor for 307masts, section 305-305-304-303 used 302 sub-section. Subline sample 7.2m

Wind Energy Department
 Design by: MIKE ANAN
 Drawn by: ANAN 09-12-01
 Redrawn by: ANAN 10-04-16
 S3916A/DESIGN/S3916A01-01 sheet 1 of 1

17



Figur 11 Forhold mellem 10-min vindhastighed målt i 45m fra soniske anemometre og lidar ved måleposition Vest.



Figur 12 Forhold mellem standard afvigelse af vindhastighed målt fra kopanemometer (40m) og lidar (45m) ved måleposition Vest.

4.4 Målekampagne

Lidar målingerne blev påbegyndt den 28 januar 2010 og er stadig i drift (medio august 2010). Tidsserie af vindhastigheder (måleposition Vest: Figur 13, måleposition Nord: Figur 14, måleposition Syd: Figur 15) er vist for perioden op til den 4. juni 2010. Vindretning for perioden er vist i Figur 16.

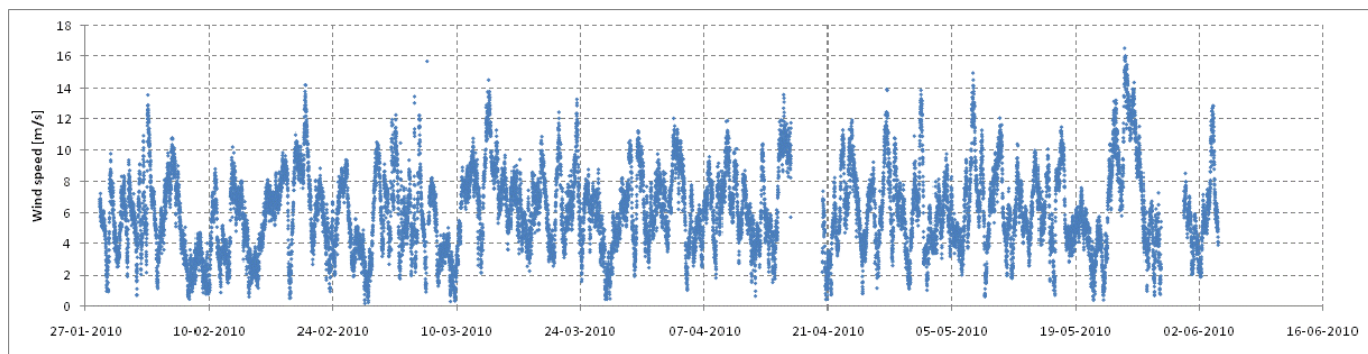
Manglende data skyldes hovedsagligt perioder med lokale strømsvigt. Lidar'erne er forsynet med tre' byggeplads' strøminstallationer, hvor forsyningskablerne er trukket flere kilometer henover jorden. Det giver en overfølsomhed for udfald der skyldes lynnedslag. System tilgængelighed – dvs. hvor meget lidarerne har været tændt og måleklar i hele perioden, er angivet i Tabel 3

Tabel 3 System tilgængelighed for de 3 lidars.

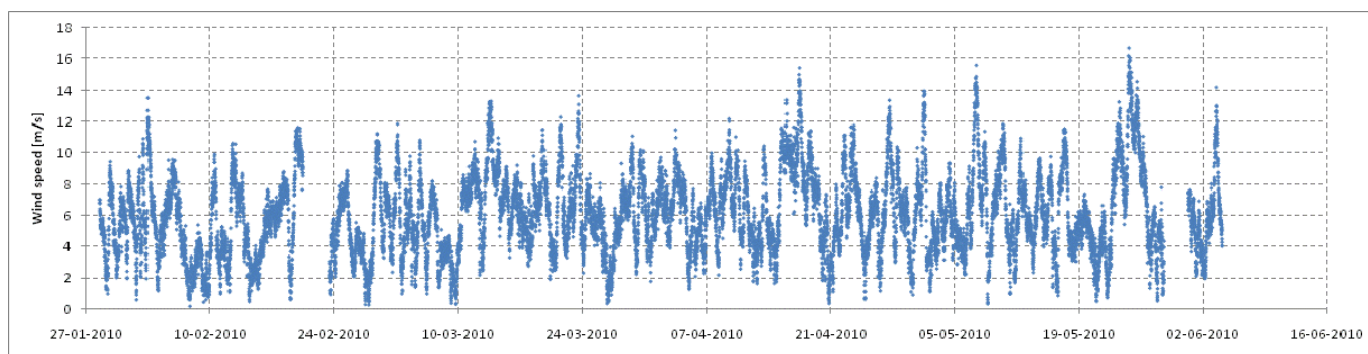
Lidar	Måleposition	System tilgængelighed [%]
62	Vest	94,3
64	Nord	97,1
66	Syd	96,0

Disse niveauer af tilgængelighed er yderste tilfredsstillende især i betragtning af den relativt unge alder af lidar teknologien. Også set i betragtning af vinteren's hårdhed er det også meget tilfredsstillende. Brug af traditionelle instrumenter kunne meget vel have resulteret i laver måletilgængelighed på grund af problemer med is og sne.

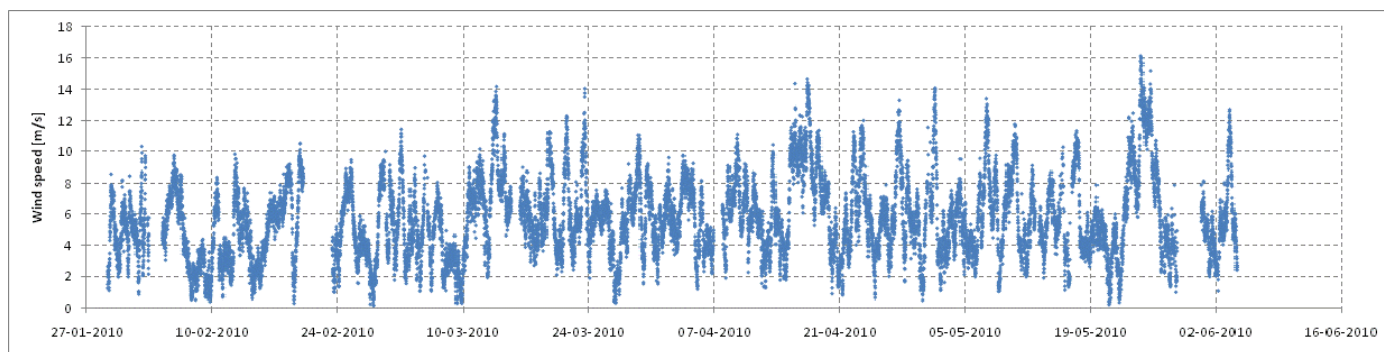
Som tidligere nævnt, falder lidaren's evner til at kunne detektere vindhastighed med målehøjde. Når lidar'en er tændt, er den maksimale målehøjde bestemt af aerosolindholdet i luften. Jo højere aerosolkoncentration, jo bedre målesignal. Fordi det reflekterede signal spredes ud og bliver svære at detektere, falder de øverste niveauer første fra. Figur 17 viser hvordan tilgængelighed variere som funktion af højden for de tre lidar. Den laver tilgængelighed for WC66 skyldes en defekt viskermotor, som siden er blevet skiftet. WC64 er fokuseret lidt lavere hvilket også resulterer i nogle lavere tilgængelighed ved svagere signaler.



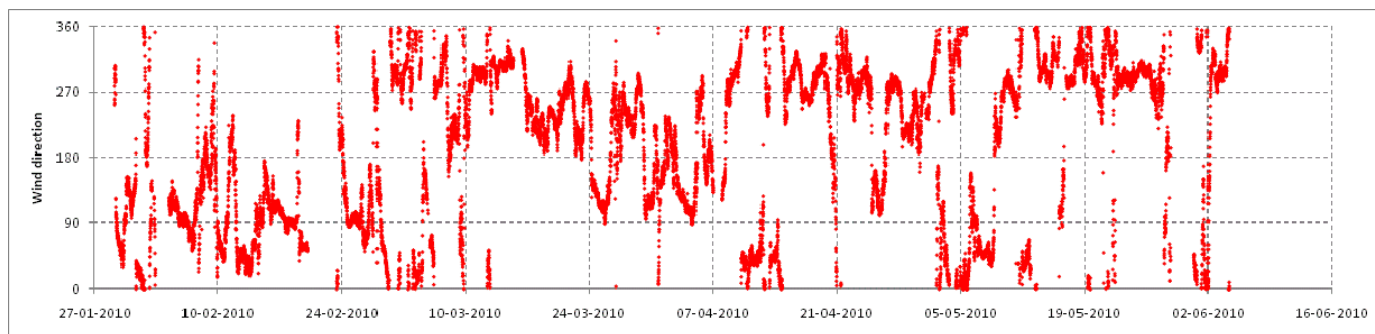
Figur 13 WC62 ved måleposition Vest. Vindhastighed i 45m siden starten af perioden.



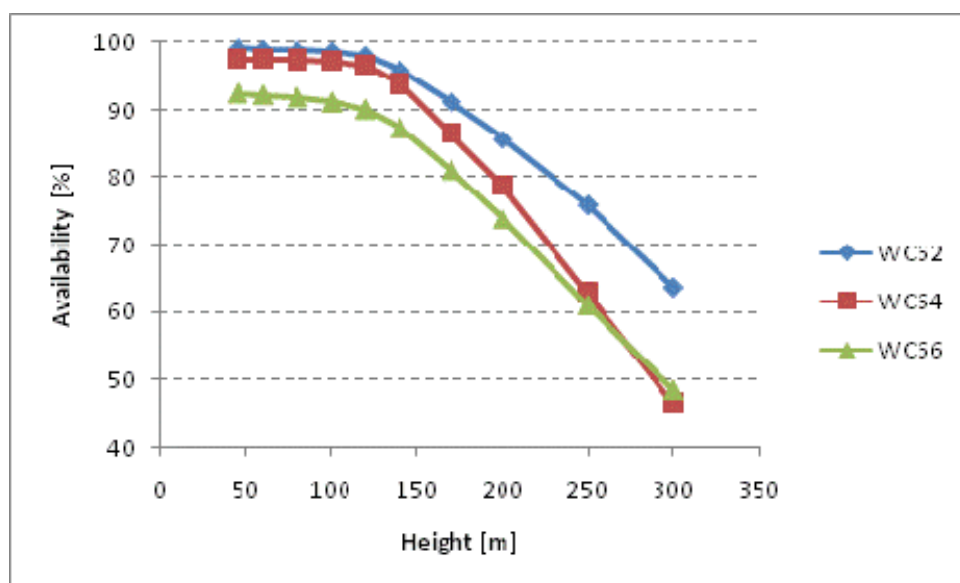
Figur 14 WC64 ved måleposition Nord. Vindhastighed i 45m siden starten af perioden.



Figur 15 WC66 ved måleposition Syd. Vindhastighed i 45m siden starten af perioden.



Figur 16 WC66 ved måleposition Syd. Vindretning i 45m siden starten af perioden.



Figur 17 Måletilgængelighed af lidar data som funktion af målehighde for de tre Østerild lidars.

5 Måleresultater

5.1 Sammenligning af nøgleparametre fra Østerild og Høvsøre

Med henblik på at foretage en overordnet vurdering af vindforholdene ved Østerild, laver vi indledningsvis en sammenligning af nøgleparametre fra Østerild (måleposition Vest) og Høvsøre (meteorologi mast) fra målinger begge steder i perioden 28 jan 2010 – 02 juni 2010. Tabel 4 viser middelhastigheder og turbulensintensitet for 4 højder. Grundlæggende kan det ses, at middelhastighederne er højere i Høvsøre. For 100m målehøjde, er langtidsmiddelhastighed i Høvsøre 9,17 m/s. Som en første tilnærmelse, ved en direkte skalering ($9,17/8,72 \cdot 7,62 = 8,03$) resulterer dette i en forventet langtidsmiddelhastighed i Østerild på lige over 8 m/s i 100m.

En anden vigtig iagttagelse er at turbulensintensitet er væsentlig højere i Østerild og at variationen af turbulensintensitet med højden er også væsentlig større.

Tabel 4 Nøgleparametre målt i Høvsøre og Østerild i perioden 28 jan til 2 juni 2010.

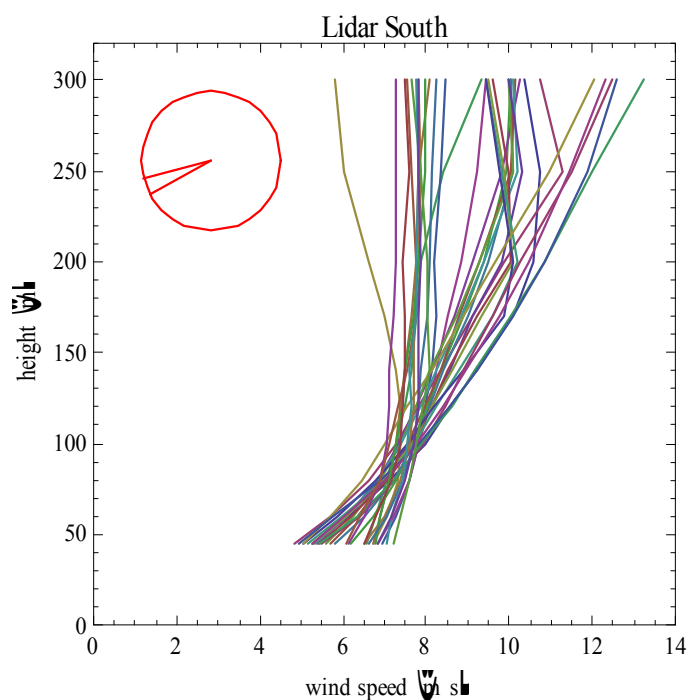
Målehøjde [m]		Middelhastighed [m/s]		Turbulensintensitet	
Høvsøre	Østerild	Høvsøre	Østerild (vest)	Høvsøre	Østerild (vest)
160	170	9,88	8,93	0,062	0,101
100	100	8,72	7,62	0,076	0,119
60	60	7,75	6,58	0,092	0,139
40	45	7,16	6,06	0,099	0,150

5.2 Profiler af middelhastighed og turbulensintensitet

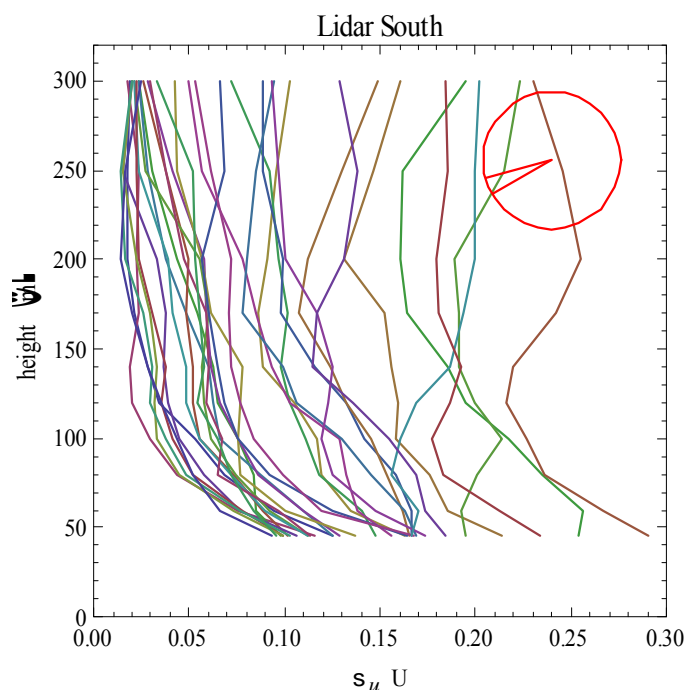
Her viser vi profiler (10-min perioder) af vindhastigheder (Figur 18) og turbulens (Figur 19) for en meget snæver vindretningssektor (sydvest) og for vindhastigheder imellem 7 og 8 m/s (i 100m højde).

Den meste slående iagttagelse af Figurne er hvor stor den naturlige variation af både middel - og turbulensprofiler egentlige er. Det fortæller at vores modeller kun er en tilnærmelse af naturen og at deres resultater ikke ukritisk må accepteres. En væsentlig parameter som endnu ikke er medtaget i modellen er den atmosfæriske stabilitet men der er muligvis andre mekanismer, f. eks. 'low-level-jets' som også giver anledning til noget af de mere ekstreme profiler. Især i betragtning af, at vi kigger på et meget begrænset og veldefineret dataset kan vi konstatere at naturen er meget kompleks!

En anden meget klar egenskab af langt de fleste af profilerne er den voldsomme ændring mellem især 50 og 100 m. Det skyldes skovens kraftige opbremsning af vinden som kan mærkes mest i de laveste højder. Samtidige genererer denne opbremsning en kraftig øget turbulens. Vi forventer at opbremsningens størrelse afhænger af afstanden til skovkanten. Nu er det vigtigt at undersøge hvordan den af skoven inducerede forøgelse i shear og turbulens varierer med afstand til skovkanten for at estimere hvor stor mulighed vi har for at påvirke den nederste dele af profilerne.



Figur 18 Profiler af middelhastighed på måleposition Syd for sydvest vindretninger og middelhastigheder mellem 7 og 8 m/s. .

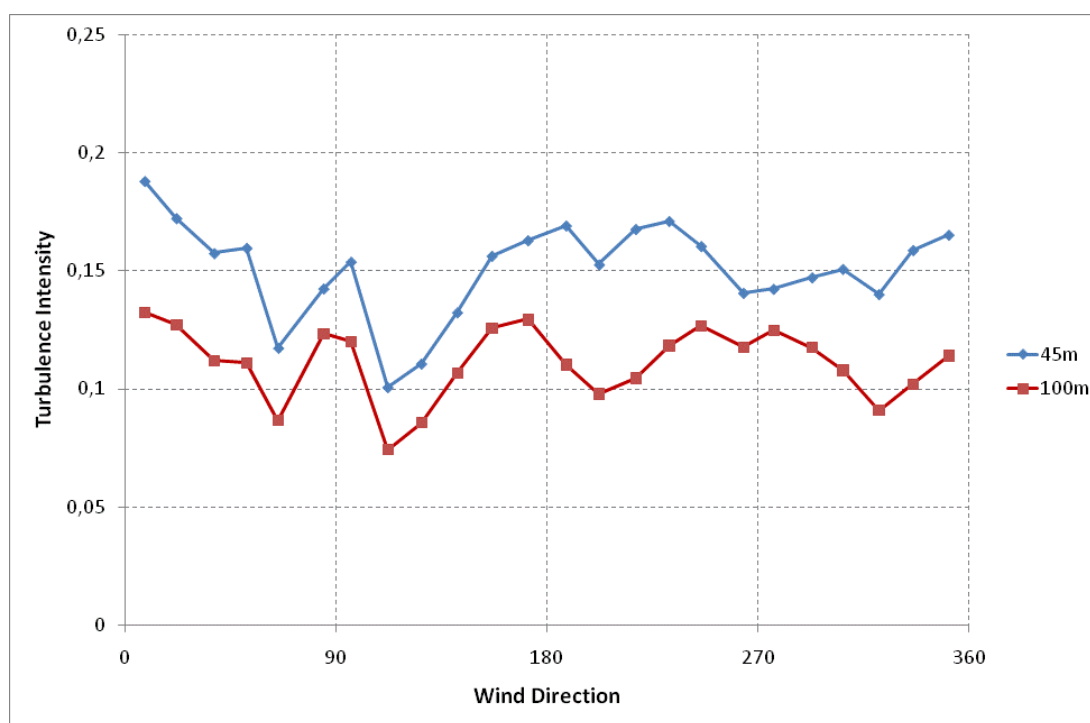


Figur 19 Profiler af turbulensintensitet på måleposition Syd for sydvest vindretninger og middelhastigheder mellem 7 og 8 m/s.

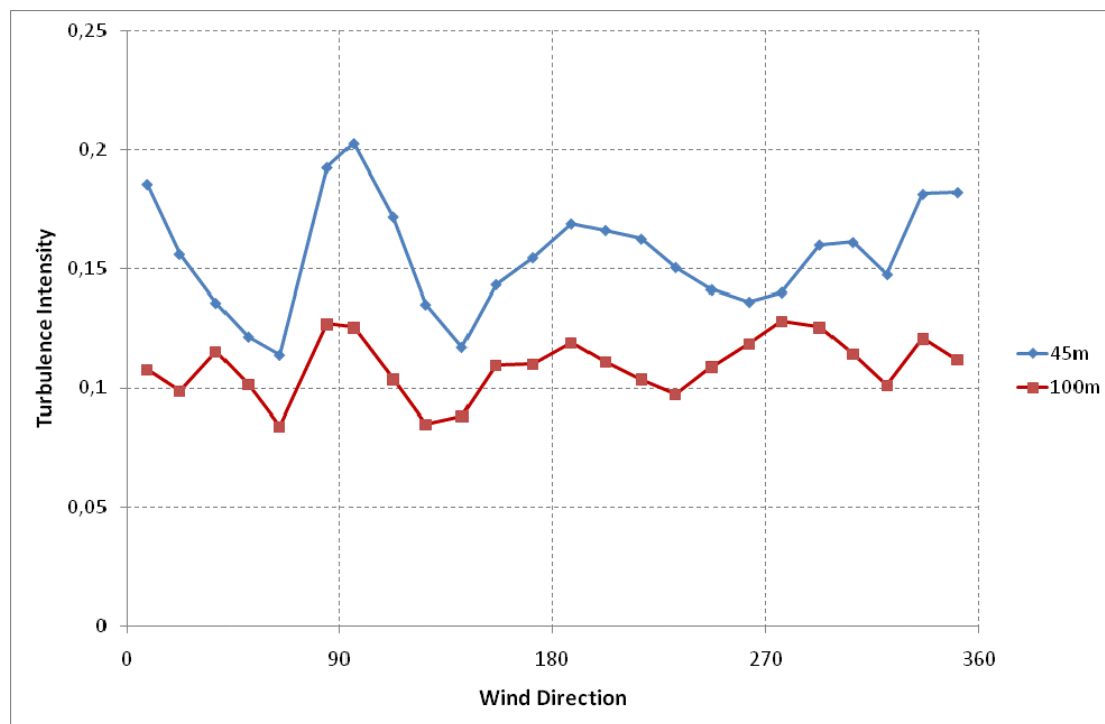
5.3 Variation af turbulens med vindretning

Selv om der findes stor naturlig variation i profilerne, så er vi nødt til at finde nogle mønstre som kan bruges til at forudsige effekten af skovrydningen. Som første forsøg ser vi her på hvordan den gennemsnitlige turbulensintensitet varierer som funktion af vindretning for de tre forskellige målepositioner. Turbulens er valgt frem for shear fordi den er en simpel parameter defineret entydigt for hver højde frem for en afledt parameter afhængig af to forskellige højde. Vi kigger på shear i et senere afsnit når metodikken er etableret for turbulens.

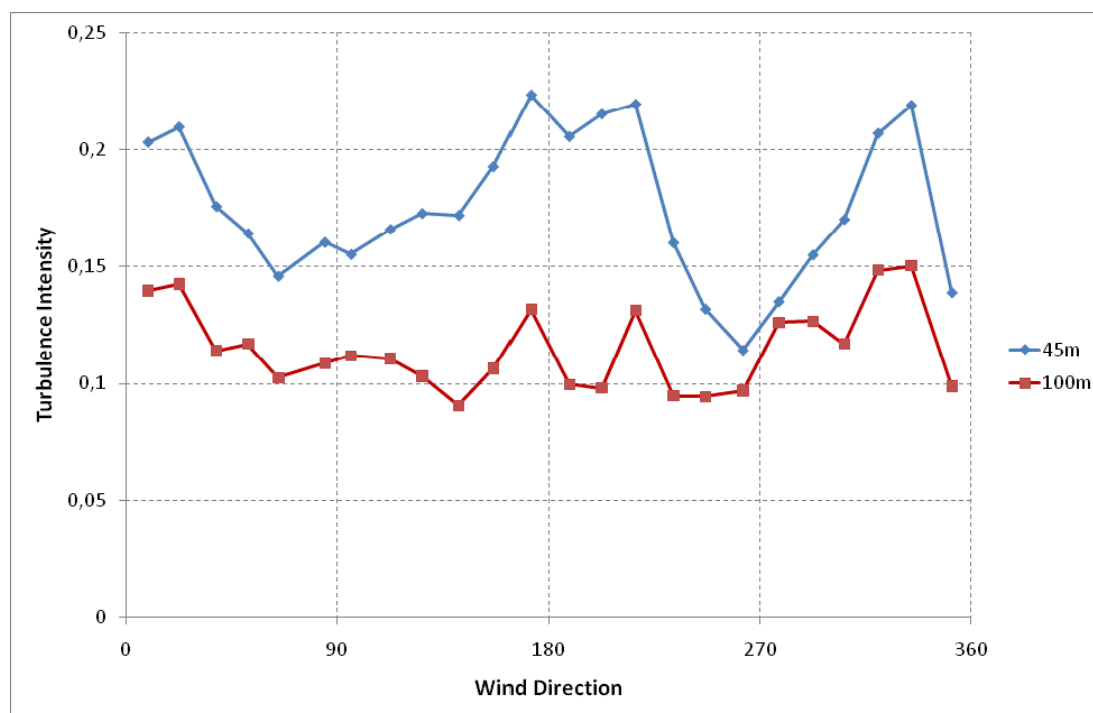
Resultaterne er viste i Figur 20 (Vest), Figur 21 (Nord) og Figur 22 (Syd) hvor på alle tre Figur viser den blå linje turbulensintensitet for 45m højde og den brune linje for 100m. Det er helt tydeligt at for alle målepositioner, at turbulensen falder meget i højdeinterval 45 til 100m, som vi fornemmede fra Figur 19. Der er meget variation med retning men generelt er turbulensen laveste i Vest og højere i Syd hvor forskellen mellem turbulens i 45m og 100m også er største. Resultaterne for Syd viser en meget tydeligt fald i den 45m turbulensintensitet for de retninger der er en åben (skovfri) sektor omkring vest. I den følgende vil vi undersøge i hvilken grad turbulens intensitet i de forskellige højder kan relateres til afstanden til skovkanten.



Figur 20 Turbulensintensitet som funktion af vindretning ved målestation Vest for 45m målehøjde (blå) og 100m målehøjde (brun).



Figur 21 Turbulensintensitet som funktion af vindretning ved målestation Nord for 45m målehighøjde (blå) og 100m målehighøjde (brun).



Figur 22 Turbulensintensitet som funktion af vindretning ved målestation Syd for 45m målehighøjde (blå) og 100m målehighøjde (brun).

5.4 Variationen af turbulensintensitet med afstand til skovkant

Med afsæt i vores iagttagelse for hvordan turbulensintensitet varierer med retning og den viden at turbulensen i de lavere niveauer er delvis generet af skoven, undersøger vi her om der findes en korrelation mellem turbulensintensitet og afstand til en skovkant.

Metoden er at anvende de samme turbulens data som i den foregående sektion men at konvertere den uafhængige variable fra retning til skovkant afstand. Det gøres med at tage hvert retning (15° intervaller) og for hvert målestation skønne skovkantens afstand (fra måleposition i den pågældende retning) ved brug af Google Earth.

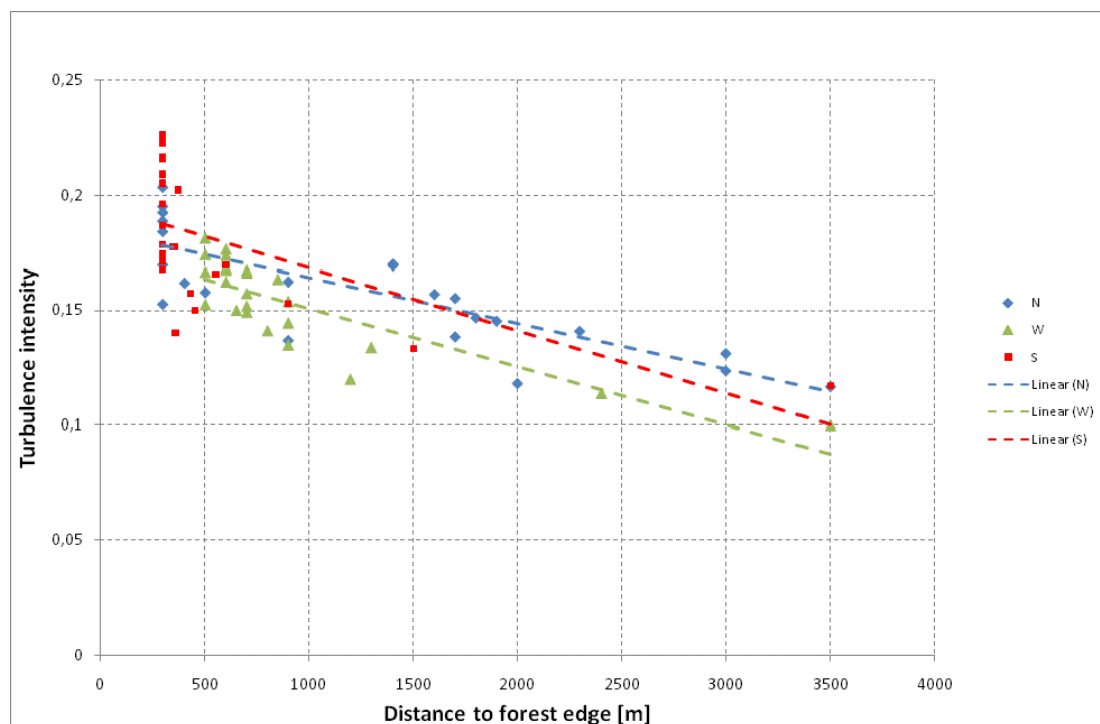
Resultaterne vises i Figur 23 for 45m og i Figur 24 for 100m. Regressionslinier for hver måleposition er tilføjet som stiplede linier. Tendensen er meget tydelig. I 45m (Figur 23) der er en klar korrelation mellem turbulensintensitet og skovkantaftand med en fald af cirka 0,02 (2%) per 1km afstand fra skovkant. I kontrast hertil er turbulensintensitet i 100m (Figur 24) kun svagt afhængig af skovkantaftand. Alle 3 målestationer viser nogenlunde den samme tendens som betragteligt styrker tilliden til analysemetoden.

Som ydligere kontrol af metoden anvendes kun data fra Nord (som har den største mangfoldighed af skovkantaftande) men data for samtlige højder mellem 45 og 140m. Resultatet ses i Figur 25. Som forventet falder både turbulensintensitet og dens hældning (med hensyn til skovkantaftand) som målehøjden stiger. I 140m højde er skovkantens indfyldelse ikke eksisterende og turbulensen er uafhængig af skovkantaftanden.

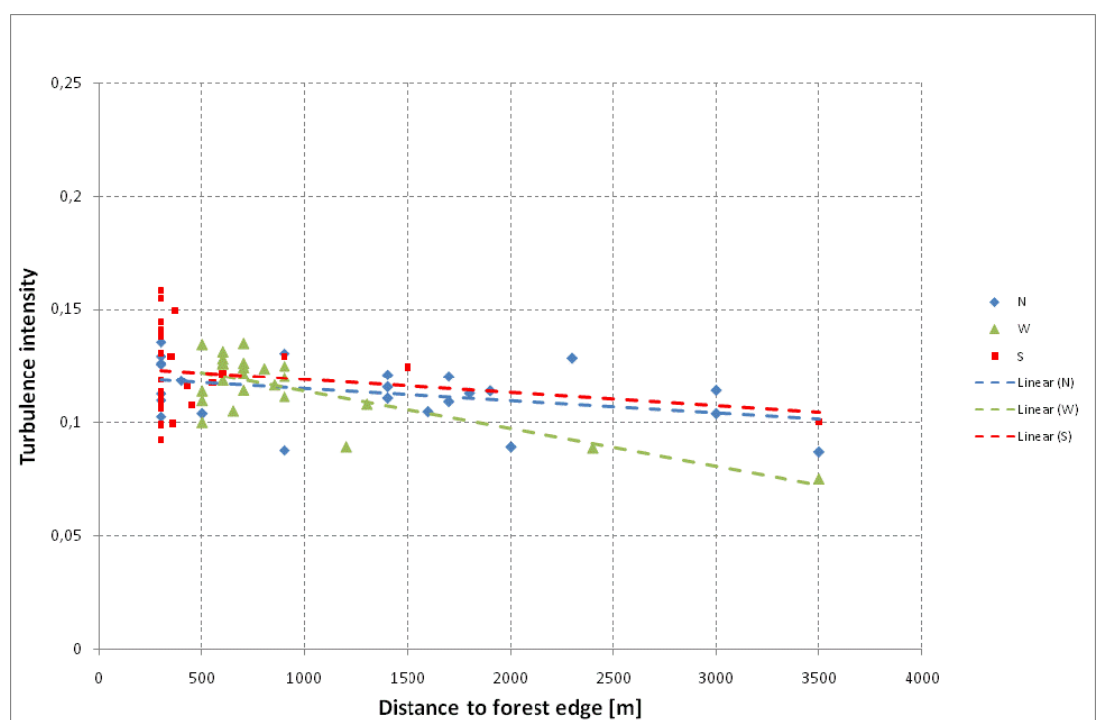
I bunden af profilen er det værd at bemærke at forskellen mellem turbulensintensitet i 45 og 60m er forholdsvis stor (omtrent 0,02). Fra 60m til 80m der er også nogenlunde den samme store forskel.

5.5 Variationen af shear med afstand til skovkant

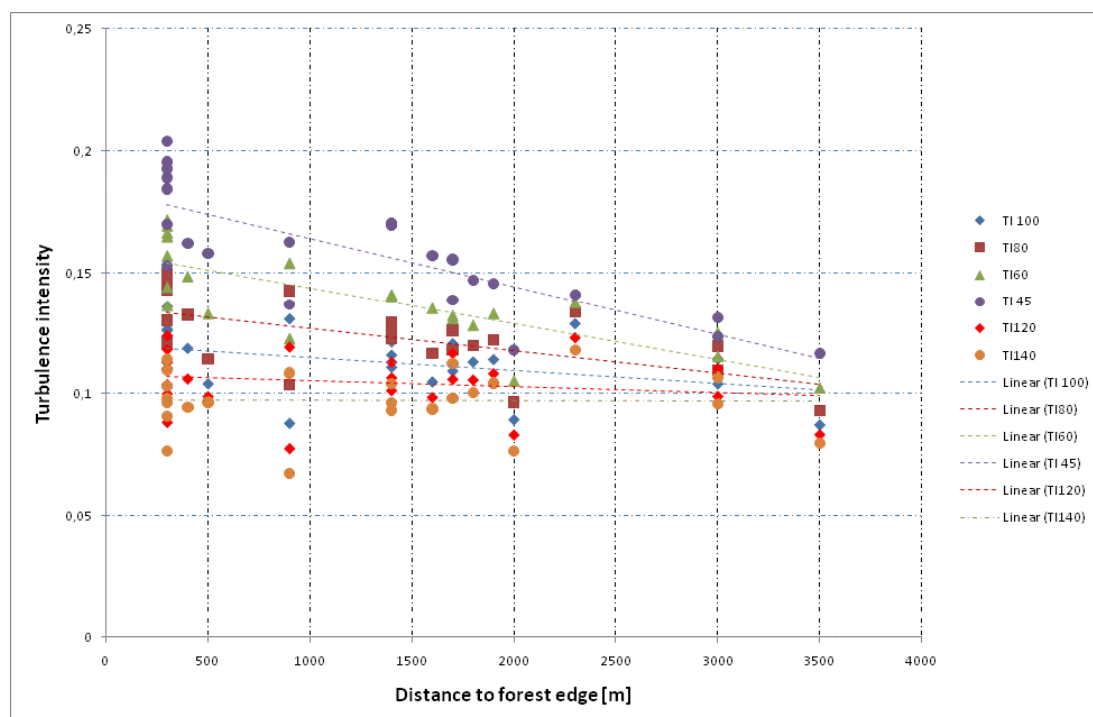
Her udnytter man den samme analysemetode som i den foregående sektion men anvendt på vindshear i stedet for turbulens. Resultatet er vist i Figur 26 hvor shear (vindhastighedsforskellen) mellem 100m og 45m er vist i blå og shear mellem 170m og 100m er vist i brun. Vi ser det samme mønster som for turbulens med en klar afhængighed mellem shear og skovkantaftand for de lavere højder og kunne svagt korrelation for de højere højder. Igen bekræfter resultaterne, at det kun er shear og turbulensintensitet under cirka 100m, som vi vil kunne påvirke med forskellige grader af skovrydning.



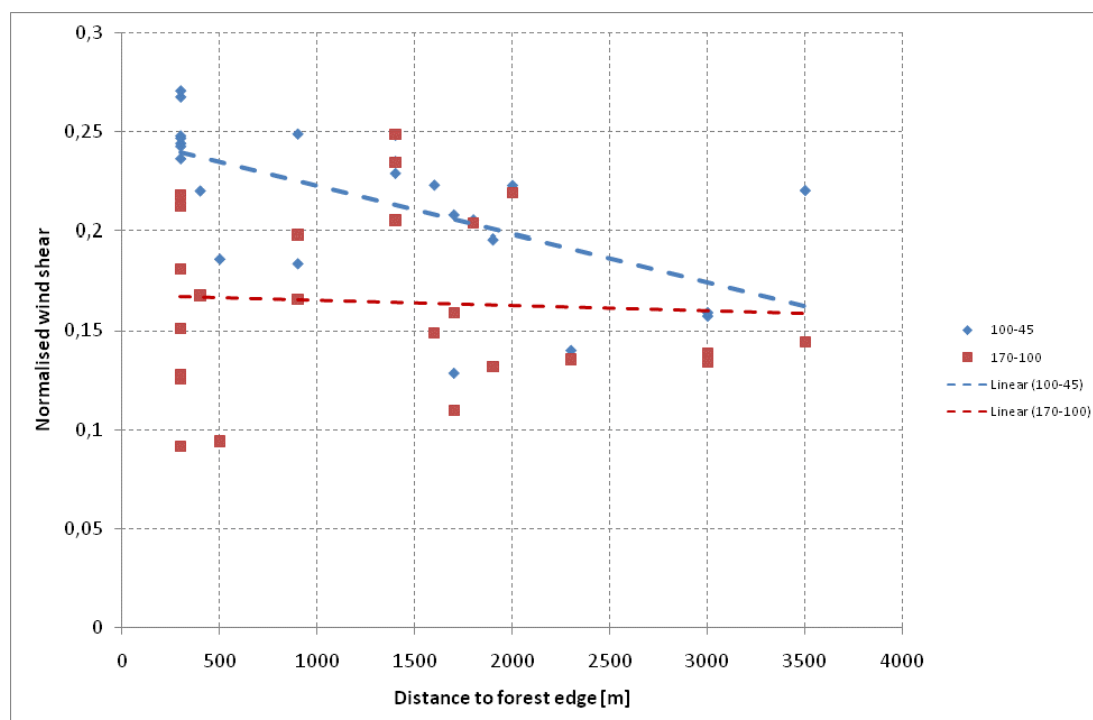
Figur 23 Turbulensintensitet i 45m som funktion af afstand til skovkant for alle 3 målepositioner.



Figur 24 Turbulensintensitet i 100m som funktion af afstand til skovkant for alle 3 målepositioner.



Figur 25 Turbulensintensitet for 6 forskellige højde fra måleposition Nord.



Figur 26 Normaliserede shear som funktion af afstand til skov kant for måleposition Nord. Shear mellem 100 og 45m: blå og shear mellem 170 og 100m: brun.

6 Opsamling og diskussion

Vores opgaver er at undersøge den (mindste) mængde skovrydning som er nødvendige for at det kommende testcenter kan præstere målinger af høj kvalitet. Som vi har set i sektion 2.1, er de formelle krav til effektkurvemålinger et langt, uforstyrret terræn foran møllerne. Med de store mølletyper som er forudset Østerild, kræver dette formelt 4 km fri for træer. Imidlertid er en skovrydning af den størrelsesorden ikke nødvendigt hvilket både modelberegninger og målinger viser uden at gå for meget på kompromis med det kommende testcenters kvalitet.

Af afgørende vigtighed for vurdering af vindforholdene på et vindmølle testcenter, er både shear (variationen af vindhastigheden med højden) og turbulens (den hurtige variation af vindhastigheden). Vi ønsker en strømning hvor hverken shear eller turbulens er for stor. Endvidere er det vigtig at variation af turbulens med højden ikke er for kraftig især fordi testcenteret er tiltænkt 'offshore' møller hvor turbulensen normalt er forholdsvis konstant over hele rotorplanen. En kraftig varierende turbulens kan gøre det usikkert at relatere målinger foretaget ved Østerild til mølle på andre typer af terræn, især til offshore placeringer.

Fra den foretagne modellering kan vi uddrag følgende:

- Den øverste dele af profilen (fra 100m og op ad) er relativt upåvirket af afstanden til skovgrænsen. Dette gælder både shear og turbulens.
- Omvendt er den nederste dele af profilen (under 100m) kraftig påvirket af afstanden til skovgrænsen.
- Når vi flytter skovgrænsen i modellen fra 1,5 km til 2 km (eller mere) fra møllen, ser vi ikke den store ændring i shear i den nederste del af profilen.
- Det samme gælder turbulensen. Endvidere, med en skovgrænseafstand på mindste 1,5 km, er variation af turbulensen med højden på et acceptabelt niveau.
- Såfremt der er en skovgrænse på under 1 km vil der være væsentlig forskel både mht. shear og turbulensintensitet mellem målemast og vindmølle. En mindre afstand fra målemast til skovkant giver en væsentlig usikkerhed vedrørende sammenhæng mellem vindforhold ved målemast i forhold til vindforhold ved vindmøllen og leder til en uacceptabel stor usikkerhed på målingerne.

Mange af disse forudsigelser er bekræftet at målinger:

- Over 100 meters højde afhænger shear ikke særlig meget af afstand til skovgrænse
- Under 100 meters højder er shear stærkt afhængig af afstand til skovgrænse
- Over 150 meters højde er turbulensen meget lidt afhængighed af afstand til skovgrænse
- Under 100 meters højde er turbulensen stærkt afhængig af afstand til skovgrænse

Vores bedste vurdering er at en skovgrænse afstand på 1,5 km giver et turbulensniveau og et shear der er i orden i forhold til at målinger skal accepteres internationalt. Endvidere kan det nævnes at afstanden på 1,5 km giver et forventet turbulensniveau der opfylder de tyske krav til turbulens i forbindelse med effektmålinger.

Dog skal det anføres at der er usikkerheder knyttet både til målingerne og til modelleringen af vindforholdene. Når skovrydning ud til 1,5 km er foretaget anbefales at fortsætte målingerne for at verificere at vurderingen af vindforholdene ligger inden for det der er beskrevet ovenfor. Afviger vindforholdene væsentlig, kan det blive nødvendigt at foretage yderligere skovrydning.

7 Konklusion

Sammenfattende anbefales en afstand fra vindmølle til skovkant på 1,5 km. Der er knyttet væsentlige usikkerheder til anbefalingen i forhold til hvorvidt afstanden er tilstrækkelig.

Derfor anbefales det endvidere at fortsætte målingerne i området efter skovrydningen med henblik på at vurdere hvorvidt vindforholdene herefter er tilstrækkelig homogene til at give en tilfredsstillende høj nøjagtighed af målingerne eller der skal foretages yderligere skovrydning.

Referencer

- [1] Julia Gottschall, Michael Courtney; *Verification test for three WindCube™ WLS7 LiDARs at the Høvsøre test site* ; Risø-R-1732(EN) May 2010.
- [2] A. Sogachev and O. Panferov. Modification of two-equation models to account for plant drag. *Boundary-Layer Meteorology*, **121**(2):229-266, Nov 2006.
- [3] A. Sogachev. A note on two-equation closure modeling of canopy flow. *Boundary-Layer Meteorology*, **130**(3):423-435, Mar 2009
- [4] F. Bingöl. Complex Terrain and Wind Lidars. *PhD thesis*. Risø-PhD-52(EN) 2009.
- [5] E.L. Petersen, I. Troen, S. Frandsen and K.Hedegaard. *Windatlas for Denmark. A rational method for wind energy siting*. Risø-R-428. Risø National Laboratory, Denmark 1981.
- [6] I. Troen and E.L.Petersen, *European Wind Atlas*. Risø National Laboratory, 1989. ISBN 87-550-1482-8.

Anerkendelser

Modelberegninger er lavet af Andrey Sogachev som er ophavsmand til SCADIS modellen. Vores Risø DTU kollega Ebba Delwik har også bidraget til mange diskussioner omkring modelleringsprocessen.

Målinger er udført af teknikere i TEM, Risø DTU, som alle takkes for en professionel indsats. På forsides billede ses Bjarne Sønderskov (tv.) og Anders Vestergård fra Høvsøre Prøvestation som har stået for installationen og dagligt drift af de 3 lidars.

Skov- og Naturstyrelsen, Thy har bidraget med meget lokal og skov-teknisk støtte. Vi takker især Claus Rasmussen og Henrik Schjødt Kristensen.

Vi ville gerne udtrykke vores taknemmelighed til vores partner i Østerild arbejdsgruppen; Per Hesselund Lourtisen (Siemens Wind Power), Karl Henrik Svendsen (Vestas Energy Systems), Lars Dalsgaard Sørensen (Skov- og Naturstyrelsen, København) og Karina Lindvig (Vindmølleindustrien) for mange stimulerende diskussioner og konstruktivt forslag.

Erik Lundtang Petersen, Risø DTU, takkes for en meget effektivt og produktivt korrekturlæsning.

Risø DTU er Nationallaboratoriet for Bæredygtig Energi. Forskningen er rettet mod udviklingen af klimavenlige energiteknologier og energisystemer, og bidrager til innovation, uddannelse og rådgivning. Risø DTU har store forsøgsfaciliteter og tværfaglige forskningsmiljøer og inkluderer kompetencecenteret for nukleare teknologier.

Risø DTU
Nationallaboratoriet for Bæredygtig Energi
Danmarks Tekniske Universitet

Frederiksborgvej 399
Postboks 49
4000 Roskilde
Telefon 4677 4677
Fax 4677 5688

www.risoe.dtu.dk